

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra Elektroenergetiky

Využití Peltierových termočlánků jako alternativního zdroje energie

Using Peltier Thermocouple as an Alternative Energy Source

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Hawliczek**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **Využití Peltierových termočlánků jako alternativního zdroje energie**
Using Peltier Thermocouple as an Alternative Energy Source

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor Peltierových termočlánků
2. Typy Peltierových termočlánků, jejich účinnosti, vlastnosti
3. Využití Peltierových termočlánků v elektroenergetice
4. Základní měření Peltierových termočlánků
5. Návrh praktického příkladu využití Peltierových termočlánků


Seznam doporučené odborné literatury:
dle pokynů vedoucího bakalářské práce

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Zdeněk Medvec**

Datum zadání: 19.11.2010
Datum odevzdání: 06.05.2011





prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne

Podpis.....

Poděkování:

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce, kterým byl doc. Dr. Ing. Zdeněk Medvec, za vhodnou metodickou a odbornou pomoc při zpracování této bakalářské práce a za zajištění podmínek pro měření.

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá možnostmi využití odpadního tepla pomocí Peltierových termoelektrických článků – termobaterií typu TEG. U běžných tepelných a jaderných elektráren je účinnost přeměny tepelné energie na elektrickou kolem 30 až 40%. Zbytek tepelné energie se může využívat pro vytápění, avšak jaderné elektrárny, které jsou postaveny většinou dále od větších měst, toto teplo vypouští bez užitku do atmosféry skrz chladicí věže. Toto odpadní teplo je nízkopotenciální, proto ho nelze využít k pohonu dalších mechanických strojů. V poslední době se však naskytla nová možnost využití tohoto nízkopotenciálního tepla a to pomocí Peltierových termobaterií typu TEG, které přeměňují teplo přímo na elektrický proud.

Tato práce rozebírá historii vývoje a elektrické vlastnosti těchto termobaterií, jsou v ní podrobně měřeny elektrické vlastnosti konkrétních termobaterií. Následně jsou zpracovány teoretické výpočty návratnosti a možnosti reálného využití dnes zbytečně nevyužitého nízkopotenciálního odpadního tepla.

Abstract:

This bachelor's thesis deals with the possibilities of heat recovery through Thermoelectric Peltier cells - thermobattery TEG. In standard thermal and nuclear power Plants is the efficiency of converting heat energy into electricity around 30-40%. Rest of the heat energy can be used for heating but the nuclear power plants which are build far away from larger cities exhale this waste heat into atmosphere through cooling towers. This waste heat is low potential, so it can not be used to powering other mechanical engines. Recently, a new possibility to use this low potential heat occurred, using a Peltier thermobatteries TEG which convert heat directly into electricity.

This thesis analyses the history of development and electrical characteristics of such thermobatteries. There are detailed measurements of electrical characteristics of specific thermobatteries. Subsequently, theoretical calculations of returns and the possibilities of real use of low potential waste heat today are processed.

Klíčová slova:

Peltierův, Termočlánek, Termobaterie, Generátor, TEG, TEC, Tepelná Elektrárna, Jaderná Elektrárna, Odpadní teplo, Chladicí věž

Key word:

Peltier, Thermocouple, Thermobattery, Generator, TEG, TEC, Thermal power plant, Nuclear power plant, Waste heat, Cooling tower

Seznam použitých symbolů a zkratek:

c	Měrná tepelná kapacita	[J/kg·K]
I	Proud	[A]
m	Hmotnost	[kg]
P	Výkon	[W]
Q	Teplo (tepelná energie)	[J]
Q_P	Peltierovo teplo	[J]
Q_T	Thomsonovo teplo	[J]
R	Elektrický odpor	[Ω]
RTG	Radioizotopový Termoelektrický Generátor	
t	Čas	[s]
T_1	Teplota chladné strany termobaterie	[K]
T_2	Teplota horké strany termobaterie	[K]
ΔT	Teplotní gradient	[K]
TEG	Termoelektrický generátor (Thermo Electric Generator)	
TEC	Termoelektrický chladič (Thermo Electric Cooler)	
U	Napětí	[V]
ΔU	Rozdíl napětí generovaný termoelektrickým článkem	[V]
Z	Z parametr	[K ⁻¹]
α	Seebeckův koeficient	[V·K ⁻¹]
γ	Měrná elektrická vodivost	[$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$]
η	Účinnost	[%]
λ	Měrná tepelná vodivost	[m ⁻¹ ·K ⁻¹]
Φ	Tepelný tok	[W]

Obsah:

1. ÚVOD.....	1
2. ROZBOR PELTIEROVÝCH TERMOČLÁNKŮ	2
2.1 HISTORICKÁ POSLOUPNOST OBJEVOVÁNÍ TERMoeLEKTRICKÝCH JEVŮ.....	2
2.1.1 Historie vynálezů založených na termoelektrických jevech.....	4
2.1.2 Termoelektrické generátory v kosmickém programu	9
2.2 SEZNÁMENÍ S TEPELNÝMI VELIČINAMI A TERMOČLÁNKY	11
2.2.1 Teplota	11
2.2.2 Teplo.....	11
2.2.3 Tepelný tok	12
2.2.4 Termočlánek.....	12
2.2.5 Termoelektrický jev	12
2.2.6 Kontaktní napětí.....	13
2.2.7 Seebeckův jev	13
2.2.8 Tok částic difuzí.....	14
3. TYPY TERMOČLÁNKŮ.....	15
3.1 ROZDĚLENÍ TERMOČLÁNKŮ PODLE POUŽITELNOSTI	15
3.1.1 Termočlánky určené k měření teplot	15
3.1.2 Termočlánky určené k chlazení	16
3.1.3 Termočlánky určené ke generování elektrické energie	16
4. MATERIÁLY A VÝROBA TEG TERMOČLÁNKŮ	17
4.1 ZT PARAMETR	17
4.2 VLASTNOSTI MATERIÁLU PRO VÝROBU NÍZKOTEPLŮTNÍCH TEG	19
4.2.1 Bismut – Chemický značka Bi	19
4.2.2 Tellur - Chemický značka Te.....	20
4.2.3 Selen - Chemický značka Se	21
4.3 TEPELNÉ NAMÁHÁNÍ TERMOBATERIÍ.....	22
4.4 FYZICKÉ USPOŘÁDÁNÍ TERMOBATERIE:	23
5. MĚŘENÍ PELTEROVÝCH TERMOBATERIÍ.....	24
5.1 NABÍDKA TEG A TEC TERMOBATERIÍ NA TRHU.....	24
5.1.1 Rozdělení termobaterií dle jejich fyzického tvaru	25
5.1.2 Orientační ceny termobaterií typu TEG	28
5.2 PARAMETRY TERMOBATERIÍ TEG1(2)-12610-5.1	29
5.2.1 Rozdíl mezi termobateriemi TEG1 a TEG2:	29
5.2.2 Aktuální vývoj TEG termobaterií	30
5.2.3 Vlastnosti termobaterie TEG1-12610-5.1 dle výrobce:	30
5.3 MĚŘENÍ TERMOBATERIÍ TEG1(2)-12610-5.1	31
5.3.1 Měření TEG2-12610-5.1	31
5.3.2 Měření TEG1-12610-5.1	42
6. NÁVRH VYUŽITÍ TEG TERMOBATERIÍ V ENERGETICE.....	51
6.1 VYUŽITÍ TEG TERMOBATERIÍ JAKO MALÉHO ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE	51
6.2 NÁVRH VYUŽITÍ TEG TERMOBATERIÍ PRO ODPADNÍ TEPLO Z ELEKTRÁREN	54
6.2.1 Umístění TEG generátoru paralelně ke chladicí věži	55
6.2.2 TEG generátor s vlastním chladičem	56
6.2.3 Výpočet výkonu a návratnosti TEG generátoru v elektrárně	57
7. ZÁVĚR.....	58

Seznam obrázků:

Obr. 2-1 Jean Charles Peltier.....	2
Obr. 2-2 Thomas Johann Seebeck.....	2
Obr. 2-3 První zdokumentovaný termoelektrický generátor z roku 1840.....	4
Obr. 2-4 Plynový termoelektrický generátor z roku asi 1860.....	5
Obr. 2-5 Výkres termoelektrického generátoru z roku 1864.....	5
Obr. 2-6 Becquerelův termoelektrický generátor.....	6
Obr. 2-7 Clamondův a Clamondův vylepšený termoelektrický generátor.....	6
Obr. 2-8 Návrh termoelektrické lampy.....	7
Obr. 2-9 Rádiový přijímač napájený petrolejovou lampou.....	7
Obr. 2-10 Reálný vzhled petrolejové lampy jako termoelektrického generátoru.....	8
Obr. 2-11 Návrh a prototyp TEG využívajícího horkých výfukových plynů v automobilu.....	8
Obr. 2-12 Rozžhavená tyč s rozpadajícím se Plutoniem 238.....	9
Obr. 2-13 Vesmírné sondy, které využívají energii z RTG [23].....	9
Obr. 2-14 Jeden z RTG z bývalého sovětského svazu.....	10
Obr. 2-15 RTG SNAP-27 KTV umístěn na měsíci.....	10
Obr. 2-16 Návrh RTG použitý v sondě Cassini [23].....	10
Obr. 2-17 Reálný vzhled RTG použitého v sondě Cassini.....	10
Obr. 2-18 Schéma termoelektrického článku.....	13
Obr. 4-1 Teplotní závislost ZT parametru.....	18
Obr. 4-2 Krystal bismutu.....	19
Obr. 4-3 Kovový tellur.....	20
Obr. 4-4 Práškový elementární selen.....	21
Obr. 4-5 Vznik mechanického napětí při rozdílu teplot.....	22
Obr. 4-6 Prasklina sloupku způsobená tepelnou roztažností.....	22
Obr. 4-7 Jedna série P a N můstku se spojovacím můstkem.....	23
Obr. 4-8 Fyzické uspořádání termobaterie.....	23
Obr. 5-1 Klasická Peltierová termobaterie.....	25
Obr. 5-2 Vysokoteplotní termobaterie.....	25
Obr. 5-3 Klasická kaskádní Peltierová termobaterie.....	26
Obr. 5-4 Dvojitá Peltierová termobaterie.....	26
Obr. 5-5 Válcovitá Peltierová termobaterie.....	26
Obr. 5-6 Miniaturní termobaterie v porovnání s mincemi.....	27
Obr. 5-7 Válcovitá termobaterie s otvorem ponesená teplovodivým filmem.....	27
Obr. 5-8 Termobaterie TEG1-12610-5.1.....	29
Obr. 5-9 Schéma zapojení pro měření TEG2-12610-5.1.....	32
Obr. 5-10 Detail měřených termobaterií.....	33
Obr. 5-11 Celkové reálné zapojení.....	34
Obr. 5-12 Snímek z termokamery pro rozdíl teplot $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$	37
Obr. 5-13 V-A charakteristika při $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$	38
Obr. 5-14 Závislost výkonu na odebíraném proudu pro $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$	38
Obr. 5-15 Závislost výkonu na zátěžném odporu při $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$	39
Obr. 5-16 Závislost výkonu a účinnosti termobaterií na rozdílu teplot.....	40
Obr. 5-17 Schéma zapojení pro měření TEG2-12610-5.1.....	43
Obr. 5-18 Reálné měření termobaterie ve vozítku „Spalovák 2“.....	44
Obr. 5-19 3D model vozítka Spalovák 2.....	45
Obr. 5-20 Reálný vzhled vozítka Spalovák 2 před úpravou pro měření.....	45
Obr. 5-21 V-A charakteristika při $\Delta T = 80^{\circ}\text{C}$	47
Obr. 5-22 Závislost výkonu na odebíraném proudu pro $\Delta T = 80^{\circ}\text{C}$	47
Obr. 5-23 Závislost výkonu na zátěžném odporu při $\Delta T = 80^{\circ}\text{C}$	48

Obr. 5-24 Snímek rozehřívajícího se vozítka	49
Obr. 5-25 Snímek vozítka při teplotách měření:	49
Obr. 6-1 Kamna dřevo s TEG termobateriemi	51
Obr. 6-2 Model tepelného proudění v kamnech	51
Obr. 6-3 Rodina z Guatemaly s kamny	51
Obr. 6-4 Nabíjení mobilního telefonu a napájení LED světla pecí	52
Obr. 6-5 Campingová pec s TEG termobateriemi	52
Obr. 6-6 Pec pro výrobu tepla a elektrické energie	53
Obr. 6-7 Blokové schéma jaderné elektrárny	54
Obr. 6-8 Umístění TEG generátoru paralelně k chladicí věži	55
Obr. 6-9 TEG generátor s vlastním chladičem	56

Seznam tabulek:

Tab. 3-1 Dělení termočlánků podle použitých kovů	15
Tab. 4-1 Základních vlastností Bismutu	19
Tab. 4-2 Základních vlastností Telluru	20
Tab. 4-3 Základních vlastností Selenu	21
Tab. 5-1 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$	35
Tab. 5-2 Tabulka závislosti maximálního výkonu na rozdílu teplot	36
Tab. 5-3 Tabulka závislosti účinnosti a maximálního výkonu na rozdílu teplot	36
Tab. 5-4 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro TEG2-12610-5.1	46

1. Úvod

Cílem této bakalářské práce je zvážit využitelnost termoelektrických článků jako zdroje energie. Dle použitelnosti existuje termoelektrických článků celá řada. Nejstarší a zároveň stále nejpoužívanější jejich využití je jako teplotní čidlo. Před několika lety se však začaly používat termoelektrické články/ termoelektrické baterie jako zdroje chladu, tzv. články typu TEC (Thermo Electric Cooler), které po přivedení elektrického proudu vytvářejí tepelný spád, což umožňuje odčerpávání tepla z jednoho místa a jeho přesouvání na místo jiné. Tyto termobaterie typu TEC se nejčastěji používají v malých chladničkách a to především kvůli jejich tichosti, nízké hmotnosti a odolnosti vůči nárazům.

Nyní se rozmáhá ještě jejich další využití. Termoelektrické baterie je možné použít i reverzibilně na rozdíl od jejich použití pro vytváření tepelného spádu. Tedy pokud přivedeme na jednu stranu termoelektrické baterie chlad a na její druhou stranu teplo, můžeme vytvářet elektrickou energii. Takovéto termoelektrické články/baterie se nazývají termoelektrické články typu TEG (Thermo Electric Generator). TEG termobaterie se může tedy chovat jako zdroj energie, který převádí tepelnou energii na elektrickou bez jakýchkoli pohyblivých částí, což má své výhody. Mezi největší výhody patří dlouhá životnost, tichost provozu (v podstatě nulový hluk) a bezúdržbovost. Mezi nevýhody zatím patří nízká účinnost přeměny energie. U nynějších termobaterií se tato účinnost pohybuje kolem 3 až 5% při maximálních dovolených rozdílech teplot. Avšak stále se intenzivně pracuje na zvýšení jejich účinností, předpokládá se dosažení účinnosti až 10%. Účinnost je závislá na rozdílu teplot a ovlivňuje ji tzv. ZT parametr.

V práci je uvedena celá historie vývoje termočlánků a termobaterií, jejich použití od dob objevení termoelektrického jevu až do přítomnosti, kdy se termobaterií typu TEG využívá i v kosmu pro napájení sond.

Výrobci většinou uvádějí vyšší účinnost termobaterií typu TEG, než je reálná, pokud ji vůbec uvádějí, proto v této práci provádím měření všech vlastností těchto termobaterií typu TEG včetně účinnosti. Analyzuji tyto vlastnosti a porovnávám je s vlastnostmi udávanými výrobci. Dále provádím návrh termoelektrického generátoru, který by pracoval s odpadním teplem z jaderných nebo tepelných elektráren a počítám návratnost takového generátoru při různých výkupních cenách elektrické energie.

2. Rozbor Peltierových termočlánků

2.1 Historická posloupnost objevování Termoelektrických jevů

V roce 1821 objevil Thomas Johann Seebeck jev, kdy v obvodu složeného ze dvou různých kovových vodičů a v němž mezi místem styku obou vodičů a jejich volnými konci je teplotní rozdíl ΔT vzniká napětí ΔU . Roku 1834 objevil francouzský hodinář Jean Charles Peltier jev, který spočívá v uvolňování nebo pohlcování tepelné energie při průchodu stejnosměrného proudu místem styku dvou různých vodičů. Množství tohoto tepla Q_P , zvaného Peltierovým teplem je úměrné procházejícímu proudu I a na směru proudu závisí, na orientaci míst pohlcování a uvolňování tepla. Tyto dva jevy jsou v podstatě stejné, pouze inverzního charakteru.



Obr. 2-2 Thomas Johann Seebeck



Obr. 2-1 Jean Charles Peltier

William Thomson, známý později jako lord Kelvin studoval oba výše uvedené jevy na základě zákona termodynamiky a potvrdil jejich vzájemnou souvislost. Navíc objevil další jev, jenž byl po něm nazván jev Thomsonův. Zjistil totiž, že při procházení stejnosměrného proudu I homogenním vodičem, ve kterém je teplotní spád (teplotní gradient), uvolňuje nebo pohlcuje se ještě další množství tepla Q_T , takzvané Thomsonovo teplo. Z toho je zřejmé, že Thomsonův a Peltierův jev jsou jevy navzájem neoddělitelné.

C. Benedicks oznámil v letech 1920-1921 objev dalšího termoelektrického jevu, který je kvantitativně určován jen velikostí teplotního gradientu ve vodiči. Existuje-li ve vodiči teplotní gradient, přestože teploty obou konců vodiče jsou stejné, vznikne mezi konci vodiče rozdíl potenciálů. Ten je velmi malý a u kovů prakticky neměřitelný, proto existence Benedicksova jevu nebyla dlouho experimentálně prokázána. Tento jev se nakonec podařilo prokázat Z. Trousilovi na vzorcích germania a změřit rozdíl potenciálů.

Všechny výše uvedené jevy Seebeckův, Peltierův, Thomsonův a Benedicksův označujeme souhrnným názvem jevy termoelektrické. Podstata těchto jevů spočívá buď v generování termoelektrického napětí (přesně elektromotorického napětí) anebo v uvolňování a pohlcování tepla.

Jevy, při nichž se generuje termoelektrické napětí, jsou Seebeckův a Benedicksův. Inverzní jevy k nim jsou jevy Peltierův a Thomsonův, při nichž se uvolňuje a pohlcuje teplo.

Ve své době byly objevy termoelektrických jevů zastíněny pokusy s magnetickou indukcí Michaela Faradaye. Dnes však zaujímají termoelektrické jevy ve vědě své pevné místo. Na Seebeckově jevu jsou založeny termoelektrické články k měření teplot. Jako čidla teplot jsou v dnešní době termoelektrické články používány nejvíce.

Lord Rayleigh v roce 1885 formuloval problém termoelektrického generátoru pro přímou přeměnu tepelné energie na elektrickou a vypočítal jeho účinnost. Jeho výpočty však nebyly příliš správné. Vypočtená účinnost byla bohužel velice malá, proto se na celou věc rychle zapomnělo a termoelektrické jevy se staly jen okrajovou záležitostí pro výuku.

Německý fyzik E. Altenkirch v roce 1909 řešil znova problém termoelektrického generátoru a vypočetl jeho účinnost už docela přesně. V roce 1910 se zabýval využitím Peltierova jevu k termoelektrickému ochlazování. Zjistil však, že tehdy používané materiály k těmto účelům nejsou vhodné. Obrat přinesly až pokusy s polovodiči, které jsou svou účinností vhodnější jak pro termoelektrické chladiče (TEC), tak pro termoelektrické generátory (TEG). [15]

2.1.1 Historie vynálezů založených na termoelektrických jevech

Historie využívání termoelektrických jevů se začala psát roku 1821 objevem Thomase Johanna Seebecka.

Již o 2 roky později Dánský fyzik Oersted a jeho francouzský kolega Fourier vynalezli první termoelektrickou baterii v roce 1823, za použití dvojice malých antimon-bismut tyček svařovaných do série. Tento termoelektrický článek byl dále vyvinut Leopolem Nobilim a Macedoniim Mellonmi. Původně bylo toto zařízení použito pro měření teploty, avšak dalo se použít také jako první stabilní termoelektrický generátor elektrické energie.

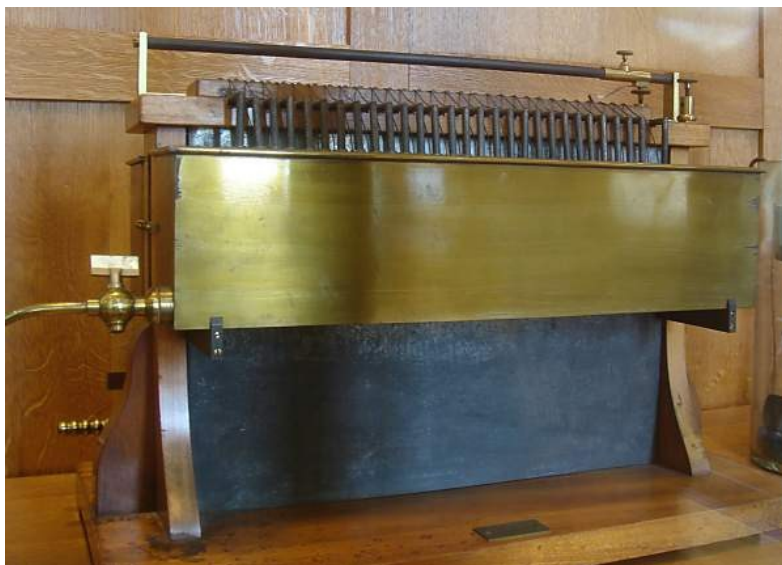
Dále pracoval na termočláncu George Simon Ohm. V roce 1825 pracoval na vztahu mezi proudem a napětím spojením vodičů s rozdílnými odpory při zapojení nakrátko. Již o čtyři roky po objevu termometrického jevu Ohm testoval různé materiály a termočlánek byl již docela dobře vyvinut. Bohužel termočlánci byly stále vnímány jako nástroj na měření teploty než možnost generování elektrické energie.

První termoelektrický generátor, který se zachoval, je asi z roku 1840. Jeho konstruktér je Claude Pouillet, který je průkopníkem v měření infračerveného záření. Vytvořil pyroheliometr, což je v podstatě kalorimetr k měření intenzity slunečního záření. Jeho termoelektrický generátor spíše sloužil také k měření teplot, avšak generoval již docela velké množství elektrické energie.



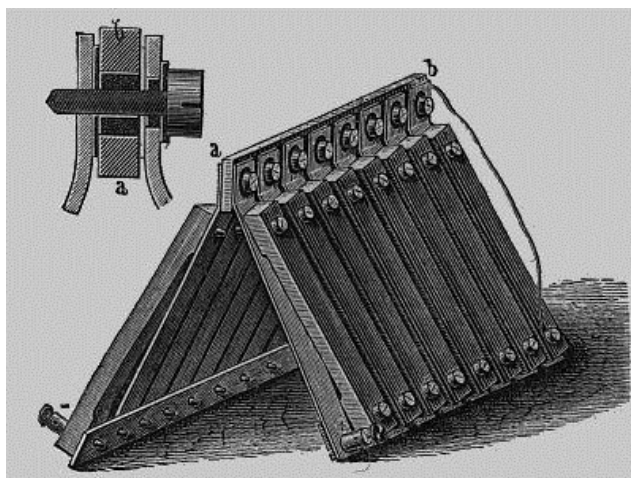
Obr. 2-3 První zdokumentovaný termoelektrický generátor z roku 1840

Další zdokumentovaný termoelektrický generátor pochází z přibližně roku 1860, jeho vynálezce je Heinrich Daniel Ruhmkorff. V černé části generátoru jsou umístěny plynové hořáky, které generují teplo, v levém dolním rohu je hrdlo pro vstup plynu a výše je vstup pro přívod chladicí vody. Nahoře je umístěn posuvný sběrač, který umožňuje změnit počet termoelektrických spojů zapojených do série, umožňuje tedy změnit výstupní napětí. Výstupní napěťové svorky jsou v pravém horním rohu.



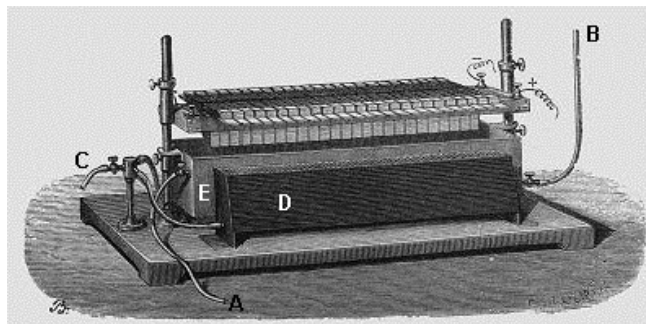
Obr. 2-4 Plynový termoelektrický generátor z roku asi 1860

Dále je zachováno spousty dokumentů s pouze výkresy termoelektrických generátorů. Například výkres Markuse z roku 1864. Termoelektrický generátor byl složen z dvaceti termočlánků, jeden termočlánek měl generovat 55mV, takže celkové generované napětí bylo kolem 1,1V. Kov, který generoval záporný pól, byl složen z kovů měď, zinek a nikl v poměru 10:6:6 a kov ke generování kladného pólu byl složen z antimonu, zinku a bismutu v poměru 12:5:1. Dolní část generátoru se ponořila do vody a horní část byla zahřívána. Problém u tohoto generátoru byla oxidace kovů ve spojích a tím pádem zvýšení vnitřního odporu.



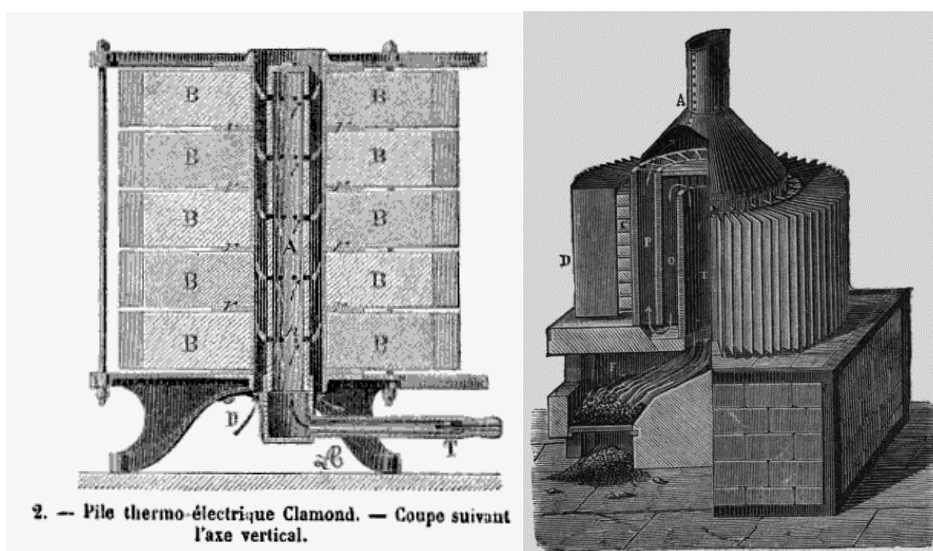
Obr. 2-5 Výkres termoelektrického generátoru z roku 1864

V době po roku 1864 bylo vytvořeno spousta návrhů termoelektrických článků. Například Edmond Becquerel, objevitel radioaktivity vytvořil jeden z návrhů.



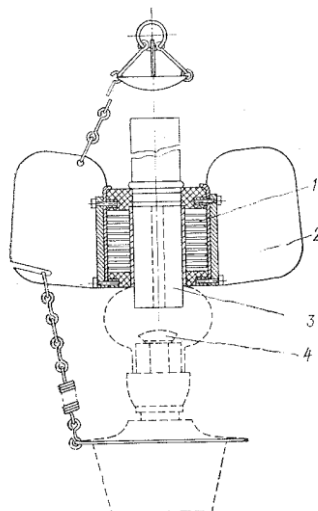
Obr. 2-6 Becquerelův termoelektrický generátor

Podobných vynálezů bylo opravdu hodně, v roce 1874 se však termoelektrickým článkům dostalo praktičtějšího využití u Clamondova termoelektrického generátoru, který je vidět na obrázku níže vlevo. Tento termoelektrický generátor pracoval na principu hořáku, kdy hořlavý plyn vstupuje přes trubici T a hoří v prstencových hořácích. Roku 1879 byl Clamondův termoelektrický generátor vylepšen, jeho náčrt je vidět na obrázku níže vpravo. Tento generátor dával naprázdno až 109 voltů a měl vnitřní odpor $15,5 \Omega$. Jeho maximální výkon byl 192 W při ideálním zatížení, tedy 54 V a 3,5 A. Jako palivo do tohoto generátoru se používal koks. Horko z hořícího koksu putovalo skrz vnitřek generátoru a zahřívalo termoelektrický článek, který je na obrázku označen jako C. Chlazení bylo vzduchové, pomocí chladiče obepínajícího celý generátor, na obrázku je označeno jako D. Celé zařízení bylo 2,5 metrů vysoké a mělo 1 metr v průměru. [19]



Obr. 2-7 Clamondův a Clamondův vylepšený termoelektrický generátor

Mnoho z těchto termoelektrických strojů bylo konstruováno v bývalém Sovětském svazu, pravděpodobně kvůli chladné zeměpisné poloze a tím pádem vyššímu využívání tepelné energie. Velice zajímavou aplikací v bývalém Sovětském svazu byla petrolejová lampa s termoelektrickými články (a kerosene lamp generator), díky které bylo možno využívat zároveň světlo z lampy na osvětlení a teplo pro termoelektrické články. Takto mohl být napájený například malý elektronkový přijímač rádiových vln. Nákres takovéto lampy je na obrázku níže. [18]



Obr. 2-8 Nákres termoelektrické lampy

1 - termoelektrický článek; 2 - chlazení termoelektrického článku;
3 - ohříváný tunel; 4 – knot

Termoelektrická lampa se začala vyrábět v roce 1959 a v praxi vypadala podobně jako obyčejná petrolejová lampa, avšak její horní část obsahovala tunel, kterým proudilo teplo, termočlánky a chladič. Takto se vyráběla dvě napětí, jedno o velikosti 1,5V a druhé 90V. Napětí 90V bylo generováno kvůli použití elektronek v rádiovém přijímači. Rádiový přijímač odebíral proud u 1,5V 125mA a u 90V 12mA. [19]



Obr. 2-9 Rádiový přijímač napájený petrolejovou lampou

Reálně byly termoelektrické petrolejové lampy vyrobeny ze železa a z hliníku. Všechny části lampy, které byly vystavovány vysokým teplotám, byly vyrobeny ze železa. A chladič, u kterého teploty už nedosahovaly tak vysokých hodnot byl vyroben z hliníku. [19]

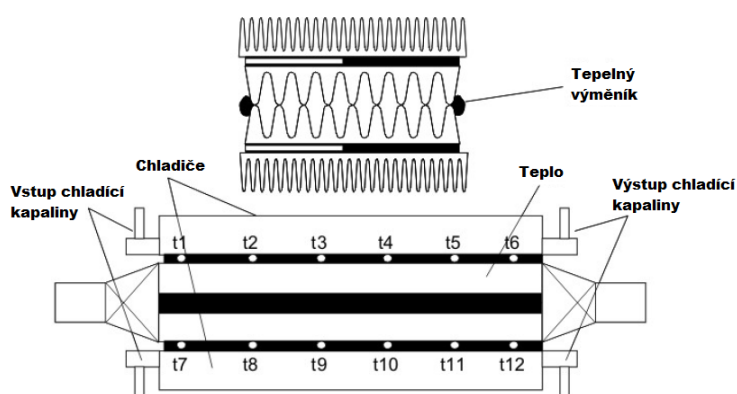


Obr. 2-10 Reálný vzhled petrolejové lampy jako termoelektrického generátoru

V poslední době se TEG využívá v kosmickém programu a také ke generování elektrické energie z horkých výfukových plynů automobilu. V automobilech lze takto nahradit alternátor s dvěma výhodami. Zaprvé se neodebírá mechanická energie z mechanické točivé energie motoru, která je zde už přeměňována s účinnosti kolem 30-40%, tedy ušetří se již zde hodně energie, která by se jinak mnohonásobně přeměnila na teplo. A zadruhé se využívá část výstupní tepelné energie.

Využití TEG v automobilech je velice účelné a pravděpodobně bude mít světlou budoucnost, pokud si uvědomí výhody tohoto konceptu automobilový výrobci.

Na obrázcích níže je prototyp takového generátoru. [24]



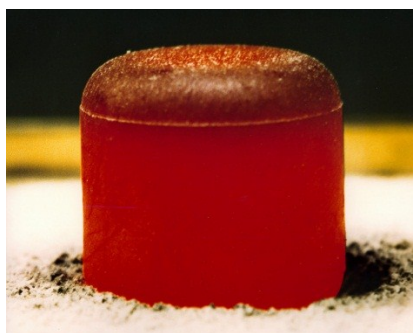
Obr. 2-11 Nákras a prototyp TEG využívajícího horkých výfukových plynů v automobilu

2.1.2 Termoelektrické generátory v kosmickém programu

V kosmu jsou jako nejrozšířenější dlouhodobý zdroj elektrické energie fotovoltaiické články. V blízkosti planety země dopadá na metr čtvereční plochy nasměrované ke slunci 1350W světelné energie. Tedy s využitím fotovoltaiických článků není žádný problém. Pokud jsou družice vystavené stále slunečnímu záření, pak není potřeba žádného jiného zdroje elektrické energie ani akumulátoru.

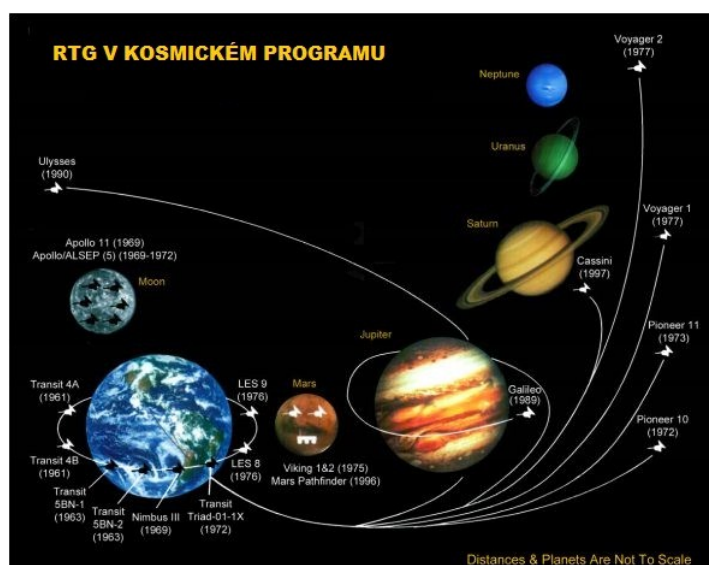
Problém však nastává, pokud musí družice pracovat s přerušovaným nebo slábnoucím slunečním zářením. Akumulátory se mohou osvědčit v případě přerušovaného záření, kde krátkodobě nahradí fotovoltaiické články. Životnost akumulátorů však není neomezená. I ty nejlepší akumulátory mají maximální životnost 10 až 20 let. Nejvíce životnost ovlivní četnost používání a velikost nabíjecího a vybíjecího proudu. Proto při optimálním využití je životnost akumulátorů jen 1 až 5 let.

Zde nacházejí využití termoelektrické články. Jako zdroje tepla se využívá rozpad radioaktivního materiálu, většinou se používá oxidu plutonia 238.



Obr. 2-12 Rozžhavená tyč s rozpadajícím se Plutoniem 238

Takovýto generátor se nazývá Radioizotopový Termoelektrický Generátor (Radioisotope Thermoelectric Generator), zkráceně RTG. Je celkem známo, že tento generátor byl použit u kosmických sond Voyager 1 a 2, kvůli jejich cestě vzdalující se od slunce, tedy nemožnosti využití solárních článků. Avšak RTG byl použit v celé řadě sond, které můžete vidět na obrázku níže. [22]

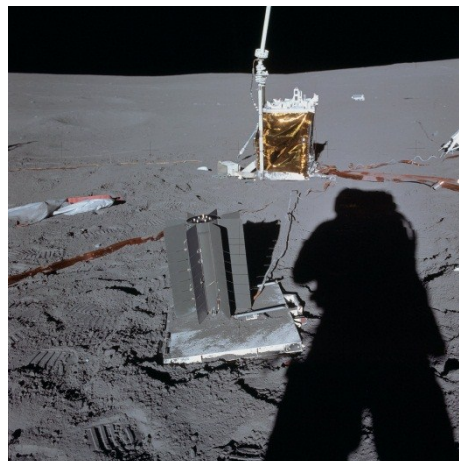


Obr. 2-13 Vesmírné sondy, které využívají energii z RTG [23]

RTG ale nejsou použity pouze ve vesmíru, ale jsou z nich vyrobeny i zdroje elektrické energie na Zemi. Například v bývalém Sovětském svazu byly RTG využity v sérii majáků, postavených za polárním kruhem. [22]



Obr. 2-14 Jeden z RTG z bývalého sovětského svazu

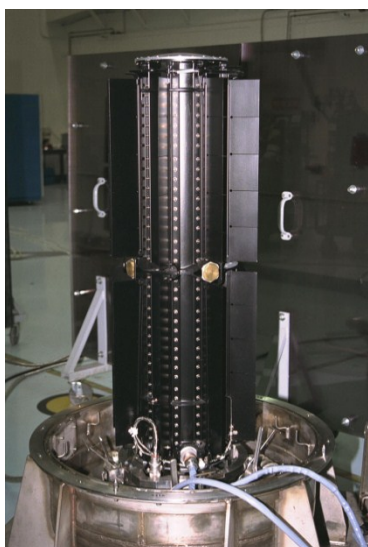


Obr. 2-15 RTG SNAP-27 KTV umístěn na měsíci

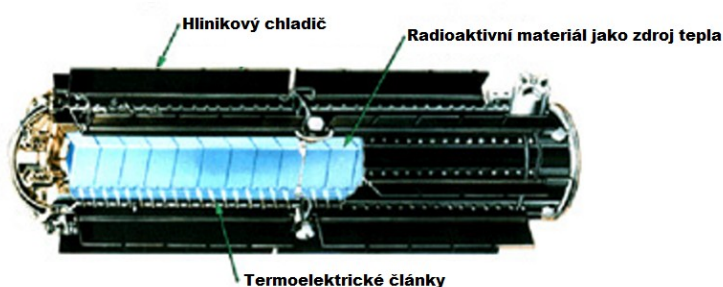
Při použití oxidu plutonia 238 je poločas rozpadu 87,7 roků. Tedy při výpočtu se výkon RTG zmenší o 0,787% za rok. Za 23 let bude RTG stále poskytovat 83,4% energie, což se i experimentálně potvrdilo při vyslání sondy Voyager 2. [22]

RTG v sondách se použily od elektrického výkonu 2,7W až po výkon 300W a s tepelným výkonem 52,5W až 4400W.

Jeden z RTG byl použit v sondě Cassini pro napájení přístrojů a počítačů. Tento konkrétní generátor měl elektrický výkon 285W a radioaktivní palivo vytvářelo tepelný výkon 4400W. Tedy je to jeden z největších RTG, váží 56 kg a jeho rozměry jsou 42 cm v průměru i s chladičem a 113cm na délku. [22]



Obr. 2-17 Reálný vzhled RTG použitého v sondě Cassini



Obr. 2-16 Náčrt RTG použitý v sondě Cassini [23]

2.2 Seznámení s tepelnými veličinami a termočlánky

2.2.1 Teplota

V technických vědách je teplota považována za skalární intenzivní veličinu, která je vzhledem ke svému pravděpodobnostnímu charakteru vhodná k popisu stavu ustálených makroskopických systémů. Teplota v mikrosvětě je definována jako kinetická energie částic.

Teplota je základní fyzikální veličinou soustavy SI a měří se v různých stupnicích. U nás se staly nejpoužívanější 2 stupnice a to stupně Celsia (°C) a Kelviny (K). Celsiova stupnice se využívá hlavně kvůli její nule v bodě mrznutí vody (273,16K). Ve fyzice je však výhodnější používat Kelvinovu stupnici díky její nule v bodě absolutní nuly (-273,16°C).

Nejnižší možnou teplotou je teplota absolutní nuly (0 K), ke které se lze libovolně přiblížit, avšak nelze ji dosáhnout.

Teplota je ústředním pojmem termiky a klíčovou veličinou pro popis tepelných jevů. Na teplotě závisí mnohé makroskopické mechanické, elektromagnetické i chemické vlastnosti látek. Její význam zasahuje do širokého spektra oborů lidské činnosti, je důležitým pojmem např. v průmyslových aplikacích, lékařství a ekologii. [1]

2.2.2 Teplo

Značka tepla je Q a jednotka Joule. Teplo je skalární veličina a vyjadřuje množství kinetické energie jednotlivých částic v tělese s určitou teplotou. Teplo je tedy definováno celkovou energií pohybu částic v tělese a je vztahováno k tělesům s jinou teplotou nebo k tělesu o teplotě absolutní nuly, které má teoreticky nulovou tepelnou energii.

Teplo se může šířit různými způsoby – vedením, prouděním a radiací. Teplo není to samé jako teplota. Teplota je pouze míra průměrné rychlosti pohybu částic v tělese, avšak teplo je množství energie uložené v pohybu těchto částic.

K měření tepla se používá kalorimetr. Množství tepla se měří relativně, poměr tepla energie jednoho tělesa o určité teplotě k teplotě tělesa o jiné teplotě. U měření hraje roli měrná tepelná kapacita tělesa, která se značí c . Měrná tepelná kapacita vyjadřuje množství tepla k ohřevu jednoho kilogramu látky o jeden teplotní stupeň (kelvin nebo stupeň Celsia).

Vzorec pro výpočet tepla:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

Ve kterém m je hmotnost daného tělesa, c je měrná tepelná kapacita tělesa a ΔT je rozdíl teplot mezi o které se těleso ohřívá nebo ochlazuje.

2.2.3 Tepelný tok

Značka tepelného toku je Φ . Tepelný tok je podíl tepla procházejícího danou plochou a doby, po kterou teplo prochází a v podstatě i výkon přenášený při průchodu tepla danou plochou.

Vzorec výpočtu tepelného toku:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2.2)$$

Ve vzorci je dQ teplo procházející určitou plochou za čas dt . Tento vzorec platí při rovnoměrném rozložení tepelného toku na procházející ploše. [17]

2.2.4 Termočlánek

Termočlánek je jednoduché zařízení složené spojením dvou různých kovů, které při rozdílu teplot na spojích generuje elektrickou energii. V dnešní době se stále nejvíce využívá jako teplotní čidlo.

Funguje však i reverzibilně, tedy po připojení napětí na termočlánek se začne jeden spoj kovů ochlazovat a druhý ohřívat, tzv. termočlánek typu TEC. Takto se používá nejčastěji jako zdroj chladu v malých přenosných ledničkách.

Další jeho využití je jako spolehlivého zdroje elektrické energie. Tedy zahříváním jedné strany termočlánu a ochlazováním strany druhé se generuje elektrická energie.

2.2.5 Termoelektrický jev

Peltier-Seebeckův jev, čili termoelektrický jev, je přímou přeměnou dvou rozdílných teplot na elektrické napětí a naopak, přeměnou elektrické energie na rozdíl teplot. Peltierův jev a Seebeckův jev jsou v podstatě opaky sebe navzájem. Mezi související jevy patří Thomsonův jev a ohřev Jouleovým teplem. Peltier-Seebeckův jev i Thomsonův jev jsou vratné.

Tento jev se používá k měření teploty, ke generování elektřiny, nebo k chlazení objektů. Řízení výkonu ohřevu a chlazení je určeno velikostí použitého napětí. Proto zařízení pracující na termoelektrickém jevu jsou vhodné tam, kde je požadována vysoká přesnost řízení teploty. [2]

2.2.6 Kontaktní napětí

Alessandro Volta zjistil při objasňování jevů pozorovaných Luigi Galvanim v roce 1795, že při styku dvou různých kovů vzniká mezi kovy rozdíl kontaktního potenciálu. Tento potenciální rozdíl nazýváme kontaktní napětí. Velikost kontaktního napětí závisí na chemickém složení stýkajících se kovů a na jejich teplotě. Alessandro Volta sestavil jednotlivé kovy do řad, v níž každý kov při styku s některým dalším členem řady má kladný potenciál.

+ Al, Zn, Pb, Sn, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd –

Tento jev, ale nelze využít jako zdroj elektrického proudu, protože v uzavřeném obvodu se kontaktní napětí navzájem vyruší. [4]

2.2.7 Seebeckův jev

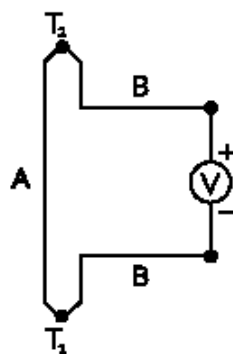
Seebeckův jev je přeměna teplotních rozdílů přímo na elektrické napětí.

Tento jev byl poprvé náhodně objeven v roce 1821 německým fyzikem Thomasem Johannem Seebeckem, který zjistil, že existuje elektrické napětí mezi dvěma konci kovové tyčky, pokud mezi těmito konci existuje teplotní gradient ΔT .

Zjistil také, že kompasová střílka je odkloněna, pokud je vytvořena uzavřená smyčka ze dvou různých kovů s teplotním rozdílem mezi spoji. Je tomu tak z důvodu rozdílné odezvy kovů na teplotní rozdíly, což vytváří proudovou smyčku, která způsobuje vznik magnetického pole.

Tento jev je vznik napětí, který nastává při teplotních rozdílech mezi dvěma rozdílnými kovy nebo polovodiči. To způsobuje nepřetržité proudění elektronů, pokud vodiče vytvoří uzavřený obvod. Vzniklé napětí je v řádu několika mikrovoltů na stupeň Celsia.

V následujícím obvodu může být měřené napětí U vyjádřeno níže uvedeným vzorcem:



Obr. 2-18 Schéma termoelektrického článku

$$\Delta U = \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.3)$$

Kde α je Seebeckův termoelektrický součinitel. Jeho velikost závisí na druhu použitých materiálů a na rozsahu teplot.

2.2.8 Tok částic difuzí

Tok částic v materiálech (elektrony v kovu, elektrony a díry v polovodičích, Ionty v Iontových vodičích) bude difundovat, když na jednom konci vodiče bude rozdílná teplota oproti druhému konci vodiče. Horká částice difunduje z horkého konce na studený konec, jakmile je nižší hustota horkých částic na studeném konci vodiče. Studená částice difunduje ze studeného konce na horký konec ze stejného důvodu. [2]

3. Typy termočlánků

3.1 Rozdělení termočlánků podle použitelnosti

Termočlánky dělíme podle použitelnosti na termočlánky k měření teplot (jako teplotní čidlo), termočlánky určené ke chlazení (TEC) a termočlánky určené ke generování elektrické energie z tepelné (TEG).

3.1.1 Termočlánky určené k měření teplot

Termočlánky určené k měření teplot jsou založeny na Seebeckově jevu. Termočlánky jsou složeny ze dvou kovů zapojených do série se dvěma spoji (kov A - spoj AB - kov B - spoj BA - kov A). Pokud mají spoje různou teplotu, vzniká na každém ze spojů odlišný elektrický potenciál, který je zdrojem elektrické energie.

Termočlánky jsou využívány jako teplotní čidla s velmi vysokou teplotní výdrží až jednotky tisíc stupňů. Citlivost se pohybuje v řádech desítek mikrovoltů na °C. Dělíme je dle použitých kovů a maximální teploty. [3]

Tab. 3-1 Dělení termočlánků podle použitých kovů

Označení termočlánku dle IEC 584	Kovy termočlánku	Maximální teplota [°C]
T	Cu-CuNi, Cu-ko	- 200 až 350
J	Fe-CuNi	- 200 až 750
E	NiCr-CuNi, ch-ko	- 100 až 900
K	Ni-Cr-Ni, ch-a	- 200 až 1200
N	NiCrSi-NiSi	- 200 až 1200
S	PtRh10-Pt	0 až 1600
R	PtRh13-Pt	0 až 1600
B	PtRh30-PtRh6	300 až 1700
Označení termočlánku dle DIN 43710	Kovy termočlánku	Maximální teplota [°C]
L	Fe-CuNi, Fe-ko	- 200 až 900
U	Cu-Ni, Cu-ko	- 200 až 600

Nejčastěji používané termočlánky v ČR jsou z obecných kovů "J" a "K" a z drahých kovů "S" a "B", čímž je pokryt rozsah teplot cca (-200 až 1700 °C), avšak s dalšími termočlánky je možné tento rozsah ještě rozšířit, např. s termočlánky na bázi wolframu a rhenia (WRh5-WRh20, W-WRh26, WRh5-WRh26, WRh3-WRh25) lze měřit až do cca 2300 °C. [4]

3.1.2 Termočlánky určené k chlazení

Termočlánky fungují i reverzibilně, tedy při průchodu elektrického proudu se jeden spoj ohřívá a druhý ochlazuje. Tohoto jevu se využívá u Peltierových termobaterií, kde je spojeno více termočlánků do série mezi keramickými deskami, tzv. termobaterie typu TEC.

V praxi se těchto termobaterií využívá u malých přenosných ledniček většinou určených do automobilů nebo karavanů. Tyto ledničky mají sice menší účinnost než klasické kompresorové ledničky, ale zato pracují mnohem tišeji (hluk vydává pouze ventilátor, pokud je v ledničce použit) a spolehlivěji.

3.1.3 Termočlánky určené ke generování elektrické energie

Výkony jednotlivých termočlánků u měření teplot jsou však velice malé, proto se termočlánky určené pro výrobu elektrické energie sdružují do větších baterií. Tyto termobaterie jsou vyrobené ze speciálních polovodičových materiálů, které zajišťují co nejvyšší účinnost přeměny tepelné energie na elektrickou. Nazývají se termobaterie typu TEG.

Fyzicky jsou uspořádány totožně jako termobaterie určené ke chlazení (TEC), pouze materiál použitý mezi keramickými deskami se liší. Více o uspořádání termobaterií v podkapitole fyzické uspořádání termobaterie.

4. Materiály a výroba TEG termočlánků

K určení ideálních materiálů k výrobě TEG termočlánků/termobaterií je potřeba znát ZT parametr. Nejvíce se osvědčily polovodivé materiály Bismut, Tellur a Selen.

4.1 ZT parametr

ZT parametr, respektive Z parametr, určuje účinnost přeměny elektrické energie na energii tepelnou. Každý termoelektrický materiál dosahuje maximální účinnosti převodu v určitém rozsahu teplot. Je tedy třeba tyto materiály najít a pak optimalizovat, aby v požadované oblasti teplot dosahovaly co nejvyšší účinnosti.

Právě kritériem pro výběr těchto materiálů je parametr termoelektrické účinnosti, tzv. Z-parametr:

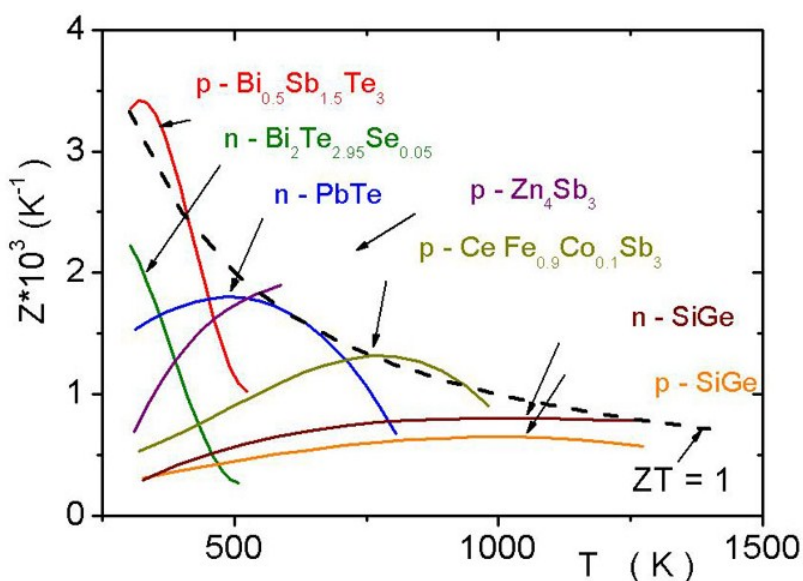
$$Z = \frac{\alpha^2 \cdot \gamma}{\lambda} \quad (3.1)$$

Kde Z je Z parametr (K^{-1}), α je a je Seebeckův koeficient ($V.K^{-1}$), γ je měrná elektrická vodivost obou materiálů ($\Omega^{-1}.m^{-1}$) a λ je měrná tepelná vodivost ($m^{-1}.K^{-1}$).

Podle Z činitele se určuje vhodnost materiálu. Se zvyšujícím se koeficientem Z, se vhodnost použití pro termoelektrické generátory zvyšuje. Pro termoelektrické články jsou tedy ideální materiály, které mají velký Seebeckův činitel, velkou měrnou elektrickou vodivost a malou měrnou tepelnou vodivost. Ideální jsou pro toto použití polovodiče. S teplotou vzrůstá koncentrace nosičů náboje a tedy i jejich energie. Na teplém konci polovodiče vzniká tlak elektronového plynu větší než na konci studeném. Dochází k rychlé difúzi elektronů ze zahřívaného spoje směrem k chladnému spoji a tím vznikají prostorové náboje, což je příčina vzniku napětí.

V kovech je tento jev velmi slabý, proto kovy nejsou vhodným materiálem pro termoelektrickou přeměnu energie. Vhodný materiál musí vyhovovat dvěma požadavkům, jež jsou protichůdné. Musí tedy být dobrým elektrickým vodičem a špatným tepelným vodičem. Těmto požadavkům nejvíce odpovídají smíšené krystaly s vysokou čistotou.

Přehled teplotní závislosti Z parametru některých perspektivních materiálů můžete vidět na obrázku níže.



Obr. 4-1 Teplotní závislost ZT parametru

K výrobě nízkoteplotních TEG termobaterií se využívá hlavně polovodivých materiálu bismut a tellur, dále se taky využívá selen. Vlastnosti těchto materiálu jsou popsány v bodech níže. [26]

Celková účinnost termobaterie se pak vypočítá podle vzorce:

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \cdot \frac{\sqrt{1 + Z \cdot \frac{T_2 - T_1}{2}} - 1}{\sqrt{1 + Z \cdot \frac{T_2 - T_1}{2}} + \frac{T_1}{T_2}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Kde η je účinnost termobaterie (%), T_1 je teplota studenějšího konce (K), T_2 je teplota teplejšího konce (K) a Z je Z parametr (K^{-1}). Prvním činitel v rovnici je termodynamická účinnost Carnotova cyklu, kterou žádný termodynamický měnič, pracující mezi teplotami T_2 a T_1 nemůže překročit. Druhý činitel závisí na konstantě Z a je vždy menší než jedna.

4.2 Vlastnosti materiálu pro výrobu nízkoteplotních TEG

K výrobě nízkoteplotních termoelektrických článků pro generování elektrické energie (TEG) se využívá materiálu Bismut, Tellur a Selen. Tyto materiály mají největší účinnost pro generování elektrické energie TEG články v oblasti od pokojových teplot až do teplot kolem 100-200°C.

4.2.1 Bismut – Chemický značka Bi

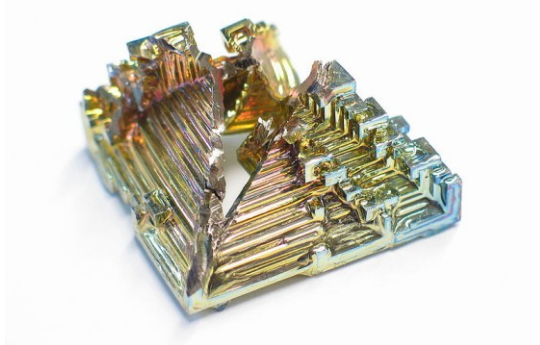
Tab. 4-1 Základních vlastností Bismutu

Atomové číslo	83
Relativní atomová hmotnost	208,98040
Elektronová konfigurace	[Xe] 4f14 5d10 6s2 6p3
Elektronegativita (Pauling)	2,02
Teplota tání	271,5 °C (544,7 K)
Teplota varu	1564 °C (1837 K)
Hustota	9,78 g.cm-3
Hustota při teplotě tání	10,05 g.cm-3
Registrační číslo CAS	7440-69-9
Tvrdość	2,25

Bismut patří mezi kovové prvky bílé barvy se slabým růžovým leskem, je křehký a hrubě krystalický, v plynném stavu tvoří bismut molekuly Bi_2 . Hlavní rozdíl od ostatních těžkých kovů je, že sloučeniny bismutu jsou netoxické, vyskytuje se v mocenství Bi^{+3} a méně často jako Bi^{+5} .

Bismut je to ušlechtilý prvek a proto se nerozpouští v neoxidujících kyselinách, snadno se však rozpouští především v kyselině chlorovodíkové za přítomnosti i malých množství oxidačních činidel (HNO_3 , H_2O_2 a podobně).

V elementární formě má bismut největší diamagnetickou konstantu ze všech známých kovových prvků, má také značně vysoký elektrický odpor a vykazuje nejvyšší hodnotu Hallova efektu ze všech kovů. Má společně se rtuťí nejnižší tepelnou vodivost ze známých kovových prvků. [5]



Obr. 4-2 Krystal bismutu

4.2.2 Tellur - Chemický značka Te

Tab. 4-2 Základních vlastností Telluru

Atomové číslo	52
Relativní atomová hmotnost	127,60
Elektronová konfigurace	[Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁴
Elektronegativita (Pauling)	2,1
Teplota tání	449,51 °C (722,66 K)
Teplota varu	988 °C (1261 K)
Hustota	6,24 g.cm ⁻³
Hustota při teplotě tání	5,70 g.cm ⁻³
Registrační číslo CAS	13494-80-9
Tvrdost	2,25
Měrný elektrický odpor při 20 °C	2*10 ⁵ μΩ·m

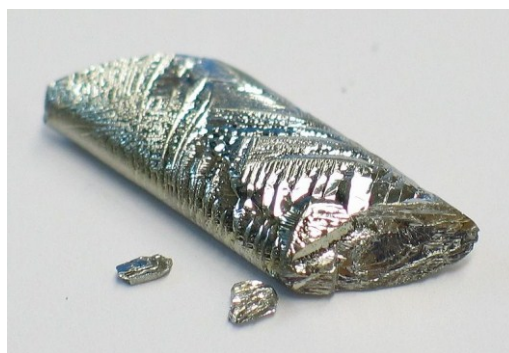
Tellur je z fyzikálního hlediska polokovový stříbrně lesklý prvek ze skupiny chalkogenů. Používá se nejčastěji v polovodičové technice a metalurgii. Z chemického hlediska patří spíše mezi kovy, ale jsou známy i kyseliny telluru a jejich soli, v nichž chemicky připomíná spíše síru nebo selen.

Tellur se průmyslově získává nejčastěji z anodových kalů po elektrolytické výrobě mědi nebo ze zbytků po rafinaci zlata. V zemské kůře se vyskytuje tellur velice málo, jeho obsah kolísá v rozmezí 0,001–0,005 ppm (mg/kg).

Jednou z hlavních využití teluridu gallia je v polovodičovém průmyslu. Tellurid bismutu se využívá pro výrobu termoelektrických zařízení.

Velice zajímavé využití se v poslední době nachází u sloučenin telluru při výrobě fotočlánků. Například fotočlánky na bázi teluridu kadmia patří v současné době k nejvýkonnějším a probíhá intenzivní výzkum s cílem vyrobit prakticky využitelné solární panely.

Na bázi teluridů pracují i záznamové vrstvy v prepisovatelných optických discích. V průmyslových provozech patří sloučeniny telluru mezi toxické a především, kde se vyskytují ve zvýšených koncentracích je třeba zachovávat přísné bezpečnostní předpisy. Nejnebezpečnější je vdechování aerosolů a prachu s vysokou koncentrací telluru. [6]



Obr. 4-3 Kovový tellur

4.2.3 Selen - Chemický značka Se

Tab. 4-3 Základních vlastností Selenu

Atomové číslo	34
Relativní atomová hmotnost	78,96
Elektronová konfigurace	[Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁴
Skupenství	Pevné
Teplota tání	221 °C (494 K)
Teplota varu	685 °C (958 K)
Elektronegativita (Pauling)	2,55
Hustota	4,81 g/cm ³ (šedý)
Hustota	4,39 g/cm ³ (alfa)

Selen je polokovový prvek ze skupiny chalkogenů, významný svými fotoelektrickými vlastnostmi. Elementární selen se vyskytuje v několika krystalických formách, tyto formy jsou zabarveny do šeda nebo tmavě červena. Selen je prakticky nerozpustný ve vodě, poměrně dobře se rozpouští v sirouhlíku.

Vyskytuje se v rudách síry a telluru. Relativní zastoupení selenu v zemské kůře i ve vesmíru je velmi nízké, průměrně je přítomen v koncentraci 0,005–0,09 ppm (mg/kg). Ve vesmíru se předpokládá poměr výskytu jednoho atomu selenu na půl miliardy atomu vodíku a v mořské vodě se vyskytuje na hranici měřitelnosti asi 0,09 mikrogramů/litr.

Selen v elementární formě je za normálních podmínek stálý, poměrně snadno se slučuje s kyslíkem a halogeny. S vodou vytvářejí oxidy selenu příslušné kyseliny a existují i jejich soli s elektropozitivními prvky, nejstálější z nich jsou selenany a seleničitany alkalických kovů.

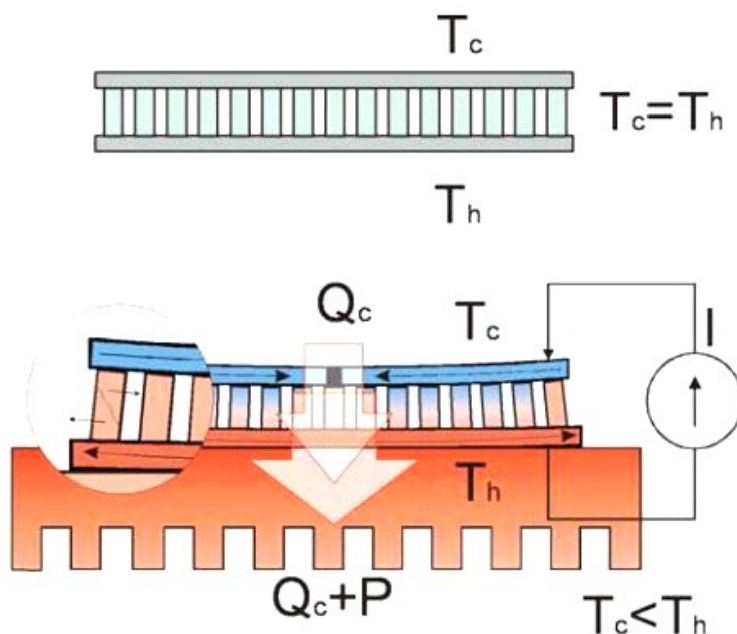
V současné době se klade velký význam selenu ve výrobě fotočlánků. Například selenidy mědi, galia a india jsou v tomto směru velmi perspektivními sloučeninami a dnes fungují fotoelektrické články na bázi selenu jako zdroje elektrické energie především v kosmickém výzkumu pro napájení přístrojů na oběžné dráze pomocí solárních panelů. [7]



Obr. 4-4 Práškový elementární selen

4.3 Tepelné namáhání termobaterií

Rozdílné koeficienty tepelné roztažnosti vedou k mechanickým tlakům při různých teplotách na stranách termobaterie a mohou způsobit ohyb nebo dokonce destrukci termobaterie. Největší problém nastává při použití nepohyblivých částí, například jednoho velkého chladiče, na kterém je připevněno více termobaterií. V případě využívání termobaterií jako stálého zdroje elektrické energie tento problém příliš nehrozí a to zprvu z důvodu relativně nízkého rozdílu teplot přiváděného na strany termobaterie a hlavně kvůli stálosti teplot jak na chladné, tak na horké straně. Největší problém by nastal při přerušovaném chodu, nebo při otáčení směru toku tepla skrz termobaterii.



Obr. 4-5 Vznik mechanického napětí při rozdílu teplot

K mechanickému poškození dochází postupně, nejdříve vznikají mikropraskliny, které se projevují malým zvyšováním vnitřního odporu, což má za důsledek snižování účinnosti termobaterie a následně dojde k prasknutí celého jednoho sloupku a tím k přerušení celého obvodu termobaterie. [27]



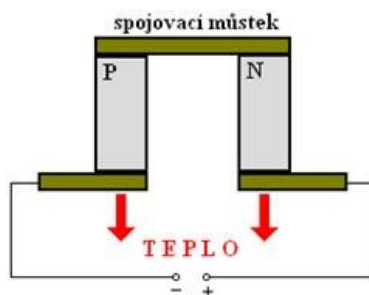
Obr. 4-6 Prasklina sloupku způsobená tepelnou roztažností

Řešení eliminace tepelného namáhání jsou v podstatě dvě. Buď navrhnout výměníky s podobnou tepelnou roztažností jaká je u keramických desek termobaterie, což je finančně náročné anebo navrhnout místo jednoho velkého výměníku více malých a tím minimalizovat součtové síly způsobené tepelnou roztažností.

Životnost termobaterií se pohybuje kolem 20 let, to však závisí na stylu používání termobaterií. Termobaterie použity v kosmu pro RTG generátory fungují ve vesmíru již přes 20 let a to za extrémních podmínek. Nyní je již sonda Voyager 1, ve které je použit RTG generátor, za hranicemi naší sluneční soustavy, kde energie ze solárních panelů už nedostačuje, avšak RTG generátor napájí sondu stále dostatečnou elektrickou energií pro její fungování a dokonce komunikování se Zemí. [10]

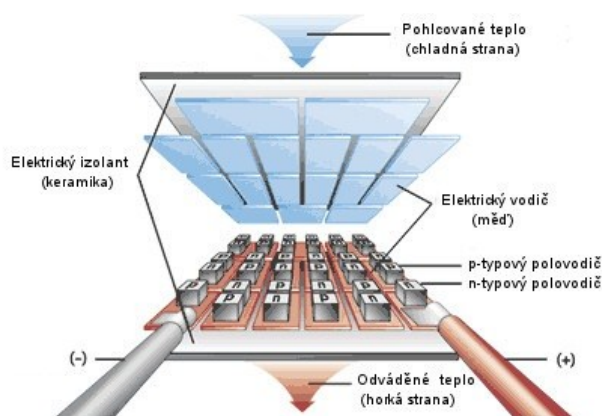
4.4 Fyzické uspořádání termobaterie:

Fyzicky se termobaterie skládá ze samotných jednotlivých termočlánků, které jsou realizovány jednotlivými P a N sloupky, které můžete vidět připojené na spojovacím měděném můstku. [28]



Obr. 4-7 Jedna série P a N můstku se spojovacím můstkem

Všechny sloupky jsou zapojeny do série a to kvůli malému generovanému napětí jednotlivých sloupků. Na začátku a konci sériově zařazených sloupků je jeden sloupek vynechán a to kvůli místu pro připojení vodiče, kterým se přivádí a odvádí elektrický proud. Celá termobaterie je vložena mezi keramické desky, které elektricky izolují a zároveň tepelně vodí. [26]



Obr. 4-8 Fyzické uspořádání termobaterie

5. Měření Pelterových termobaterií

5.1 Nabídka TEG a TEC termobaterií na trhu

Na trhu je několik firem zabývajících se vývojem nebo prodejem TEG termobaterií. Mnohem rozšířenější je prodej TEC termobaterií, které je možno koupit i v českých prodejnách, například GME (<http://www.gme.cz>) [8]. Ty mají však při generátorovém provozu mnohem menší účinnost než TEG, proto se pro výrobu elektrické energie z tepelné nehodí. TEC termobaterie se používají pouze do přenosných chladicích zařízení, například malých ledniček.

TEG termobaterie mají na trhu například firmy Thermal Electronics Corp. (<http://www.espressomilkcooler.com>) [9], kterému dodává TEG termobaterie čínský výrobce Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp. (<http://www.thermonamic.com/>) [25], Hi-Z Technology, Inc. (<http://www.hi-z.com/>) [10], Marlow Industries, Inc. (<http://www.marlow.com>) [11] a Thermalforce.de (<http://www.thermalforce.de>) [12].

Z těch jsem vybral firmu Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp. A měřil jsem její TEG termobaterie TEG1-12610-5.1 a TEG2-12610-5.1 a to kvůli jejímu aktivnímu přístupu k vývoji TEG termobaterií. Nízkoteplotní termobaterie mají o něco vyšší účinnost. U měření se však ukázalo, že TEG termobaterie od tohoto čínského výrobce nejsou nejlepší kvality. Další firma zabývající se vývojem TEG termobaterií je Hi-Z. Také velice zajímavou firmou je Thermalforce.de, která nabízí nejrůznější typy TEG termobaterií, dvojité, kaskádové, kulaté, miniaturní a vysokoteplotní s maximální provozní teplotou až do 1000°C, viz bod rozdělení termobaterií dle jejich fyzického vzhledu.

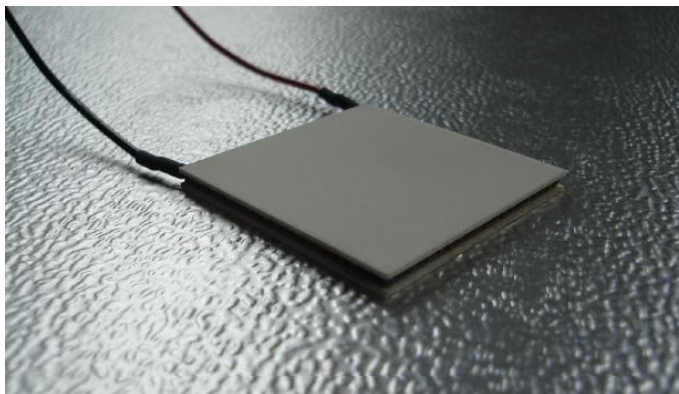
Dle mých informací je v tomto oboru nejlepší firma Hi-Z Technology, Inc. (<http://www.hi-z.com/>) [10], která dodávala TEG termobaterie i pro RTG pro kosmický program, viz bod 2.3. Při jednání s touto firmou mi poskytla nejrozsáhlejší obsah informací o jejich výrobcích, hlavně propracovaný program vytvořený v MS Excel, ve kterém se podle zadaných parametrů automaticky propočítávají výsledné parametry jejich TEG článků.

5.1.1 Rozdělení termobaterií dle jejich fyzického tvaru

Termobaterie se rozdělují na TEG, pro generování elektrické energie z rozdílu teplot a TEC, které naopak vytvářejí rozdíl teplot z elektrické energie – přečerpávají teplo. V tomto bodě však rozdělují TEG články podle jejich fyzického tvaru a tedy i použití pro nejrůznější účely, pro které je třeba zvláštního tvaru.

Klasická termobaterie:

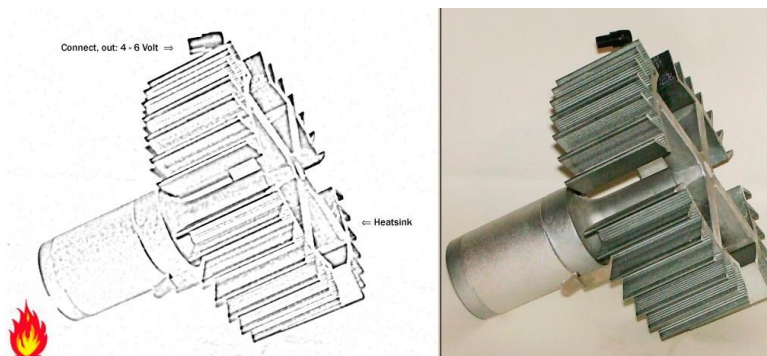
Klasické termobaterie jsou tvaru plochého hranolu. Jsou nejpoužívanější a také nejlevnější. Používají se tam, kde není potřeba jejich zvláštního tvaru. Velice často používaný rozměr těchto termobaterií je 40x40x3mm. [12]



Obr. 5-1 Klasická Peltierová termobaterie

Vysokoteplotní termobaterie:

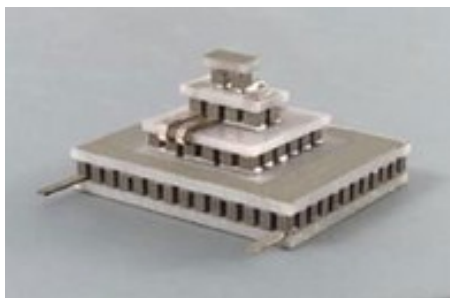
Vysokoteplotní termobaterie TEG 097-300-33 je velice zajímavý malý zdroj energie. Konkrétní kus na obrázku níže je již konstruován s chladičem, takže pro jeho provoz stačí pouze malý zdroj tepla, například hořící kahan. Při rozdílu teplot $\Delta T = 400\text{K}$ tato termobaterie vyrobí 2W elektrické energie při napětí 4-6V. Teplotní maximum na horké straně dosahuje je u této konkrétní termobaterie 1000°C . [12]



Obr. 5-2 Vysokoteplotní termobaterie

Kaskádní termobaterie:

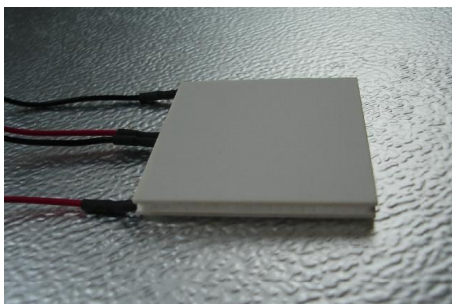
Kaskádní termobaterie jsou výhodné v tom, že se vytvoří v každé vrstvě rozdíl teplot a výsledný rozdíl se pak sčítá. To je však u TEG termobaterií nevýhodou. Kaskádní termobaterie se tedy využívají při dosahování nižších teplot než s klasickou termobaterií. Použití v aplikacích chlazení citlivých IR detektorů, CCD kamer pro snížení tepelného šumu a obecně použití v elektrooptice pro chlazení. [12]



Obr. 5-3 Klasická kaskádní Peltierová termobaterie

Dvojitá termobaterie:

Dvojitá termobaterie nemají příliš fyzikální význam, spíše elektrický, kde je článek již vevnitř zapojen ze dvou termobaterií, většinou sériově. [12]



Obr. 5-4 Dvojitá Peltierová termobaterie

Termobaterie válcovitého tvaru:

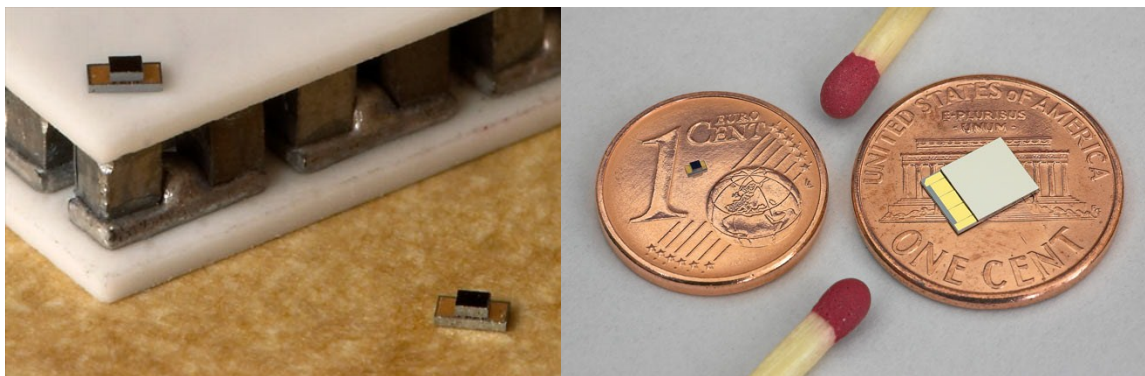
Další vyráběné termobaterie jsou válcovitého tvaru. Ty se používají spíše samostatně, k účelům kde je potřeba takového tvaru. [12]



Obr. 5-5 Válcovitá Peltierová termobaterie

Miniaturní termobaterie:

Zajímavostí v nabídce Peltierových termobaterií jsou miniaturní termobaterie, které se používají v mikroelektronice, jež je citlivá na zvýšení teploty, například laserové diody, CCD čipy a podobně. Například u CCD čipů se chlazením eliminuje šum v zachytávaném obraze a toho se hlavně využívá v kamerách umístěných v kvalitních dalekohledech určených pro sledování hvězd nebo termokamerách. [12]



Obr. 5-6 Miniaturní termobaterie v porovnání s mincemi

Termobaterie jiného tvaru:

Dále se vyrábějí termobaterie s otvorem uprostřed a také jejich povrch se liší. U některých termobaterií se nanáší tenký teplovodivý film, který kopíruje tepelné vodiče na které je následně upevněn. Články s otvorem uprostřed můžou být po obvodu jak hranolovitého, tak válcovitého tvaru. [16]



Obr. 5-7 Válcovitá termobaterie s otvorem ponesená teplovodivým filmem

5.1.2 Orientační ceny termobaterií typu TEG

Ceny termobaterií jsou u každé firmy rozdílné, avšak při odběru velkých množství (nad 1000ks) se ceny většinou pohybují kolem 10 USD za TEG termobaterie o velikosti 40x40 mm a možném maximálním výkonu do 10W (při maximálním rozdílu teplot).

Konkrétně termobaterie TEG1-12610-5.1 a TEG2-12610-5.1, firmy Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp. vyjdou cenově na 9USD při odběru 1000ks. Při malých odběrech v jednotkách kusů jsou však ceny dosti vysoké, až stovky dolarů. Podobné ceny jsou taky u firmy Thermalforce.de kolem 10 Euro/ks, při odběru 1000ks, avšak při odběrech málo kusů je cena mnohem nižší než u Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp.

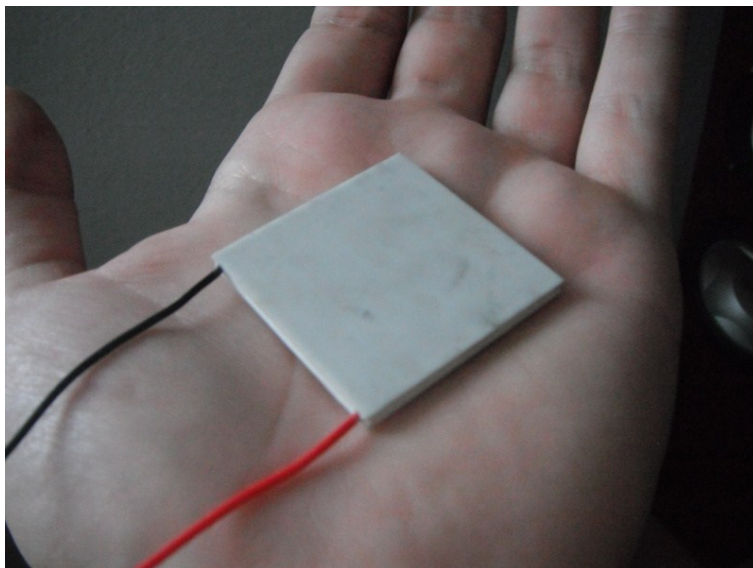
Nejlepší firmou v tomto oboru je Hi-Z Technology, Inc. u které je sice cena o poznání vyšší, avšak také kvalita mnohem vyšší. Tato firma vyrábí termobaterie i pro RTG generátory v kosmu, tedy jejich termobaterie vydrží extrémní podmínky. V rozměrech 40x40 mm však termobaterie nevyrábějí. V jejich nabídce jsou termobaterie HZ-2 (29x29x5mm) za 69USD, HZ-9 (62,7x62,7x6,51 mm) za 149USD, HZ-14 (62,7x62,7x5,08 mm) za 139USD a HZ-20 (75x75x5,08 mm) za 209USD. Jeden TEG HZ-20 vyrobí při rozdílu teplot 200°C 19W elektrické energie při účinnosti 4,5%.

HZ-20 je tedy 20x dražší než klasické TEG termobaterie a vyrobí asi 2 až 3 krát více elektrické energie při stejných podmínkách než klasické termobaterie o rozměrech 40x40 mm od firem Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp. nebo Thermalforce.de.

Termobaterie TEG1-12610-5.1 a TEG2-12610-5.1 firmy Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp., jsem vybral pro měření v této bakalářské práci z důvodu práce na dřívějším projektu, kde jsem právě tyto TEG termobaterie použil.

5.2 Parametry termobaterií TEG1(2)-12610-5.1

Termoelektrické baterie TEG1-12610-5.1 a TEG2-12610-5.1 jsou navrženy a vyrobeny technologií, která umožňuje převod tepla přímo na elektrickou energii. Tyto termobaterie jsou vyráběny z Bismut-Telluru (Bi_2Te_3).



Obr. 5-8 Termobaterie TEG1-12610-5.1

5.2.1 Rozdíl mezi termobateriemi TEG1 a TEG2:

Termobaterie se vyrábějí ve dvou verzích TEG1 a TEG2. Na první pohled jsou oba typy shodné, rozdíl je však v maximálních teplotách, kterým můžeme termobaterii vystavit a v účinnosti.

TEG1 jsou konstruovány pro vyšší maximální teploty. Teplota na horké straně může být stále 260°C a chvilkově 280°C. Tak vysokým teplotám horkou stranu termobaterie můžeme vystavit díky technologii spojování jednotlivých elementů hliníkem. To se však podepíše na jejich účinnosti, která je o něco nižší. Studená strana je však spojovaná pájkou s příměsí stříbra (SnAg 3%), jejíž teplota tání je 220°C. V žádném případě této teploty nesmíme dosáhnout, jinak by se pájka roztavila a slily by se kontakty jednotlivých termoelektrických elementů. Proto doporučená maximální teplota výrobcem na chladné straně je 180°C.

TEG2 jsou konstruovány pro nižší maximální teploty 190°C, které nesmí přesáhnout ani na jedné straně. Účinnosti jsou u tohoto typu termobaterií vyšší a to díky užití pájky s příměsí stříbra (SnAg 3%) na obou stranách.

5.2.2 Aktuální vývoj TEG termobaterií

Účinnosti přeměny tepelné energie na elektrickou u těchto termobaterií se nyní pohybují kolem 3-5%. Ovšem firma Thermal Electronics Corporation (<http://www.espressomilkcooler.com>), která vyrábí tyto termobaterie, pracuje na technologiích práškové metalurgie. Díky této technologii budou termobaterie přeměňovat tepelnou energii na elektrickou s účinností kolem 10%. Už nyní mají vyvinutou technologii, která pracuje s účinností 7-8%.

Nové TEG termobaterie budou již vyráběny na automatizovaných zařízeních a tak by jejich cena měla ještě poklesnout. Firma chce dodávat termobaterie hlavně jiným firmám, které by mohly zužít cenné odpadní teplo, a také by chtěla spolupracovat s výrobcí automobilů, ve kterých jsou také zbytečně velké tepelné ztráty a právě díky TEG termobateriím by toto teplo šlo využít a vyrobenou elektrickou energii použít například pro hybridně napájená vozidla. [13]

5.2.3 Vlastnosti termobaterie TEG1-12610-5.1 dle výrobce:

Rozměry: 40mm x 40mm x 3mm

Napětí naprázdno: 8.6V

Vnitřní odpor: 3Ω

Napětí při ideálním zatížení: 4.2V

Proud při ideálním zatížení: 1.4A

Výkon při ideálním zatížení: 5.9W

Maximální tepelný tok přes termobaterii: přibližně 140W

Tepelný tok: přibližně 8.8W/cm²

5.3 Měření termobaterií TEG1(2)-12610-5.1

Cílem mého měření Peltierových termobaterií byl popis jejich elektrických vlastností při generování elektrické energie z energie tepelné. Měření jsem prováděl na termobaterii TEG2-12610-5.1 umístěné ve vozítku a dvou TEG1-12610-5.1, které byly umístěny v tepelném výměníku. Měření se skládalo z tepelného zdroje, termobaterií, chladiče, měření vstupního tepelného (elektrického) a výstupního elektrického výkonu z termobaterií. Celý protokol z měření TEG2-12610-5.1 je umístěn v příloze č.1 a měření TEG1-12610-5.1 je umístěn v příloze č.2.

Hlavním účelem měření bylo zjistit reálnou účinnost přeměny tepelné energie na elektrickou v určitém rozsahu teplot a dále určit ideální zátěž pro různé teplotní rozdíly a porovnat jestli se shoduje s teoretickými předpoklady. Dále pak z naměřených hodnot vytvořit ekonomicky nejideálnější model reálného termoelektrického generátoru využívajícího odpadní teplo.

5.3.1 Měření TEG2-12610-5.1

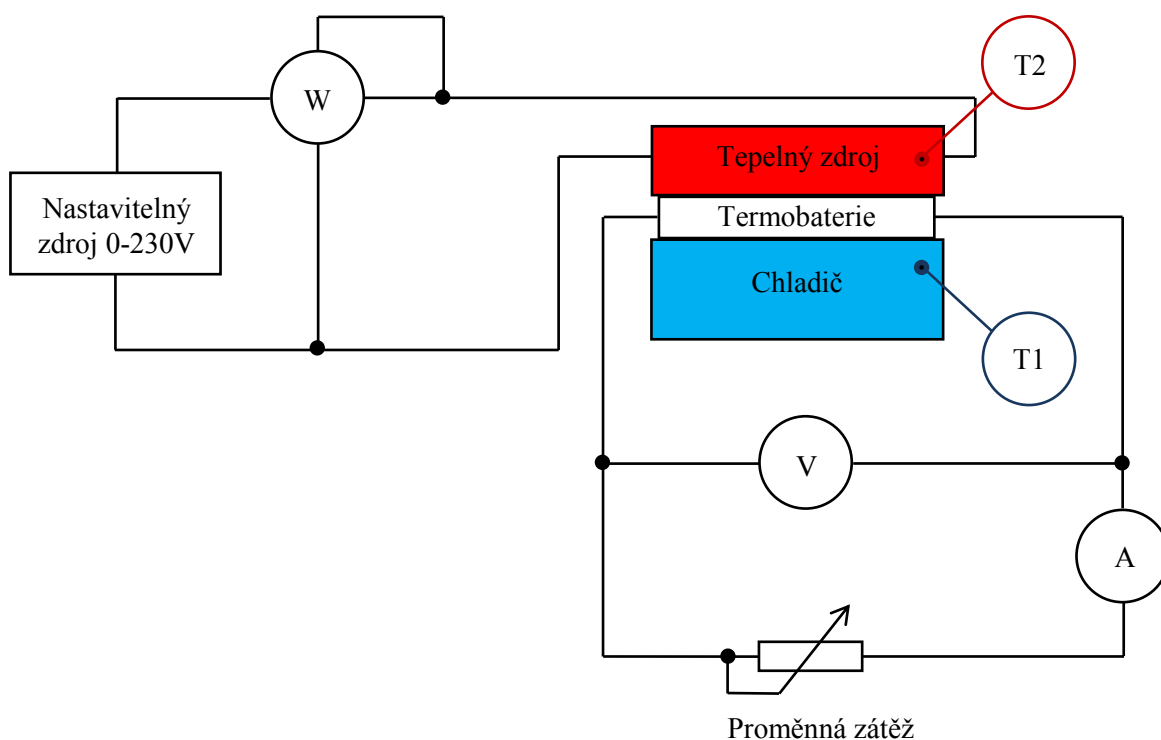
Konkrétně měření dvou Peltierových termobaterií TEG2-12610-5.1 zapojených do série. Všechny naměřené hodnoty jsou tedy pro tyto 2 termobaterie. Celý protokol z tohoto měření je umístěn v příloze č.1. V celém bodě 8.1 jsou vybrány pouze nejdůležitější informace z měření.

Postup měření:

- 1) Zapojit celé schéma pro měření.
- 2) Regulovat teplotu tak, aby se rozdíl teplot na termobateriích ustálil.
- 3) Odečíst výkon vstupující do topného elementu.
- 4) Zapsat rozdíl teplot na stranách termobaterií a vytvořit snímek termokamerou.
- 5) Provést měření VA-charakteristiky termobaterií.
- 6) Z měření nakrátko určit vnitřní odpor termobaterií.
- 7) Určit výkony termobaterií z VA-charakteristiky při měření se zátěžemi blízkými vnitřnímu odporu termobaterií a určit ideální zátěž (zátěž, u které generují termobaterie nejvyšší výkon).
- 8) Postup bodů 2 až 6 zpracovat pro rozdíl teplot od 2°C do nejvyššího možného naměřeného rozdílu.

Schéma zapojení pro měření TEG2-12610-5.1

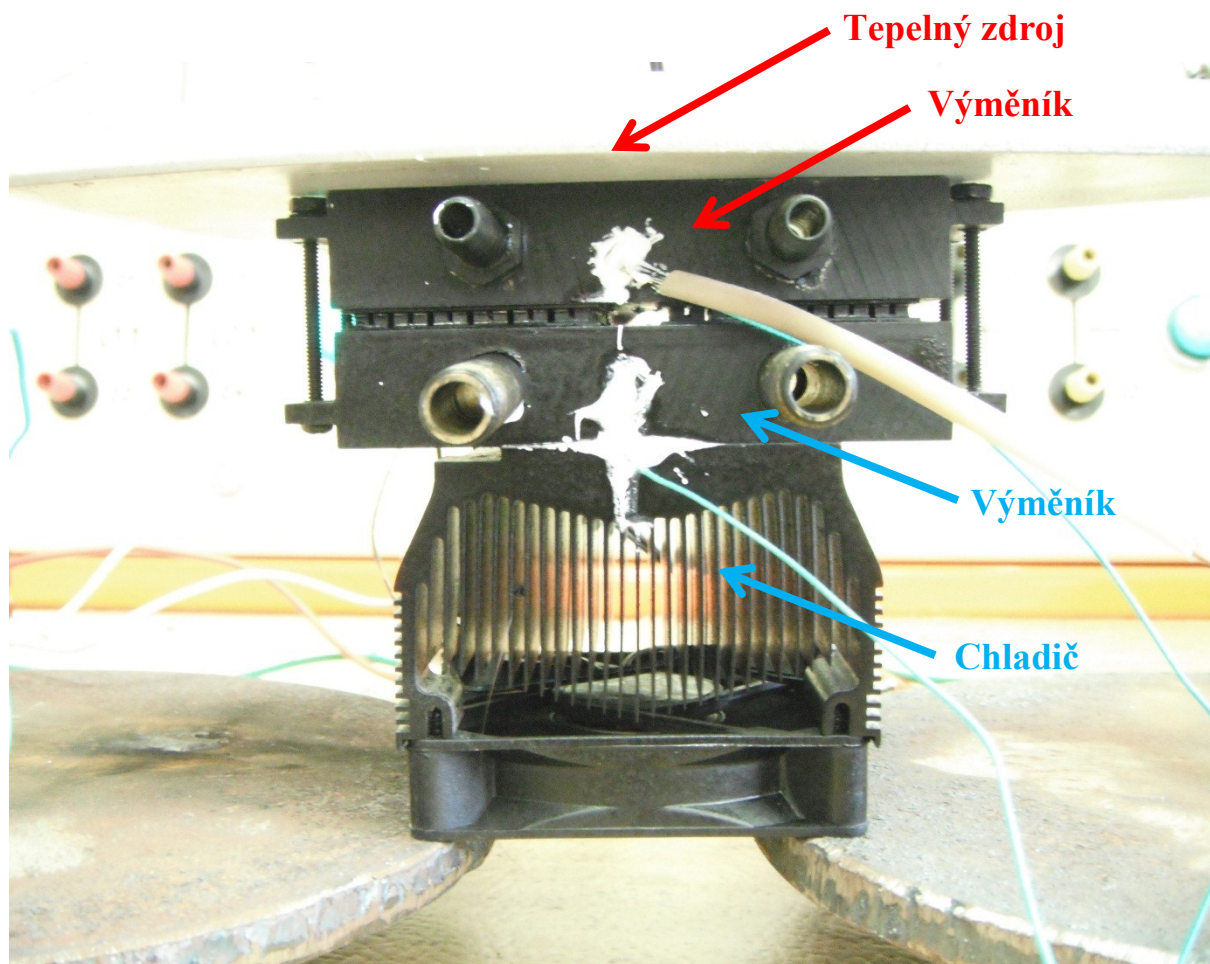
Schéma pro měření dvou termoelektrických baterií TEG2-12610-5.1 zapojených do série se skládá z tepelného zdroje, samotných termobaterií a chlazení. Tepelný zdroj je v tomto případě topný element ze žehličky využívající Joulových ztrát při průchodu elektrické energie. Tento zdroj tepla je napájen nastavitelným zdrojem střídavého proudu 0-230V (autotransfornátorem) a výkon vstupující do topného elementu je měřen wattmetrem (W). Chladič je aktivní. Teplota horké i chladné strany je měřena teplotním dataloggerem s termočlánkovými čidly (T1 a T2). Termobaterie se chovají jako zdroj elektrické energie s určitým vnitřním odporem a proto je třeba nalézt ideální zátěž pro co největší potenciál využití elektrické energie. Jako proměnná zátěž je použit reostat s relativně nízkým odporem (16Ω). Výkon termobaterií je měřen pomocí voltmetru (V) a ampérmetru (A). Voltmetr je připojen přímo na výstup termobaterií a to kvůli správnosti měření, kdy vznikne znatelný úbytek napětí na ampérmetru. V tomto zapojení se ampérmetr chová jako malý odpor v sérii s reostatem, což nevnáší do měření chybu metody.



Obr. 5-9 Schéma zapojení pro měření TEG2-12610-5.1

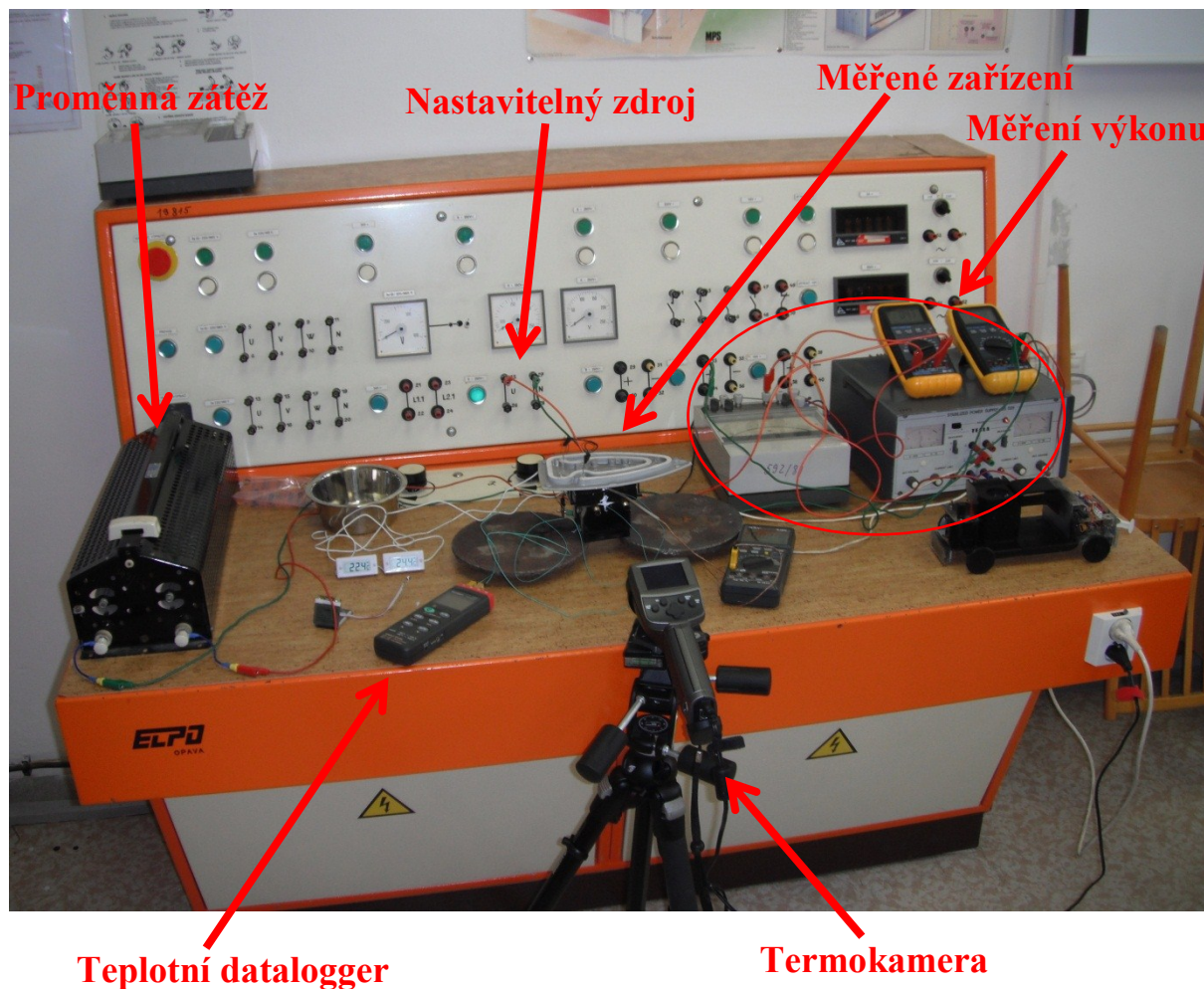
Vzhled reálného zapojení:

Reálné zapojení se skládá z topného tělesa zahřívající horní tepelný výměník a chladič používaný na chlazení procesoru v PC chladič spodní výměník. Vyčnávající trubky v tomto měření nemají účel, byly používány pouze pro předchozí měření, kdy se ke chlazení a ohřívání používala voda. Ve středech výměníků jsou přilepeny teplovodivou pastou termočlánky dataloggeru pro měření teplot. Termobaterie jsou umístěny mezi výměníky. Skládají se z malých krychliček polovodivého materiálu vykazujícího termoelektrický jev. Všechny tyto krychličky jsou spojeny do série a vytváří termobaterii. Mezi všemi spoji pro vedení tepla je namazaná teplovodivá pasta, pro co nejlepší tepelnou výměnu. Kvalitu tepelné výměny je vidět na termosnímčích v tomto protokolu níže. Výstupní vodiče termobaterií jsou na druhé straně. Výměníky a chladič je z hliníku, je však nastříkán emisivní barvou s danou emisivitou, kvůli přesnosti snímku pořízených termokamerou.



Obr. 5-10 Detail měřených termobaterií

Na dalším snímku je vidět celkové rozložení přístrojů. Jako nastavitelný zdroj energie pro tepelný element slouží stůl, ve kterém je integrovaný autotransfornátor 0-230V. Vstupní výkon je měřen analogovým wattmetrem (W) a ještě kontrolován digitálním voltmetrem a digitálním ampérmetrem. Elektrická energie proudí do měřeného zařízení, kde vytváří v topném elementu Joulovými ztrátami teplo. Energie z termobaterií je přes voltmetr (V) a ampérmetr (A) přiváděna do proměnné zátěže. Měření teplot zajišťuje teplotní datalogger a termokamera.



Obr. 5-11 Celkové reálné zapojení

Tabulky naměřených a vypočtených hodnot:

Měření bylo prováděno při okolní teplotě 20°C a vlhkosti 46%.

Tabulek je celkem 11 pro rozdíly teplot $\Delta T = 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80$ a 100°C. Každá tabulka obsahuje naměřené teploty, vypočtený rozdíl teplot, naměřené napětí a proudy pro různé zátěže a červeně vyznačený řádek pro ideální zátěž, kdy je výstupní výkon nejvyšší. Výkon termobaterií je také vypočten. Dále tabulka obsahuje naměřený vstupní výkon do topného elementu, vypočtený odpor zátěže z napětí a proudu a výkon ztrát prouděním a sáláním (výkon potřebný pro udržení stejné teploty bez zátěže termobateriemi). Jako poslední hodnota je výkon procházející termobateriemi s odpočtem ztrát prouděním a sáláním.

Dále jsou v tabulce ještě 2 vypočtené hodnoty dole a to ideální odpor zátěže ($R_{\text{ideální zátěže}}$) a účinnost přeměny tepelné energie na elektrickou (η).

Zde uvádím pouze tabulku pro rozdíl teplot $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ z důvodu využitelnosti tohoto rozdílu teplot u využívání odpadního tepla.

Tab. 5-1 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro $\Delta T = 40^\circ\text{C}$

Zátěž č.	T_1	T_2	ΔT	U	I	$P_{\text{výstupní}}$	$P_{\text{vstupní celkové}}$	$R_{\text{zátěže}}$	$P_{\text{ztráty}}$	$P_{\text{vstupní TEG}}$
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[V]	[A]	[W]	[W]	[Ω]	[W]	[W]
1	42,2	82,2	40	2,22	0	0,00	175	naprázdno	40	135
2	42,2	82,2	40	2	0,2	0,40	175	10,00	40	135
3	42,2	82,2	40	1,85	0,3	0,56	175	6,17	40	135
4	42,2	82,2	40	1,72	0,4	0,69	175	4,30	40	135
5	42,2	82,2	40	1,6	0,5	0,80	175	3,20	40	135
6	42,2	82,2	40	1,47	0,6	0,88	175	2,45	40	135
7	42,2	82,2	40	1,34	0,7	0,94	175	1,91	40	135
8	42,2	82,2	40	1,25	0,8	1,00	175	1,56	40	135
9	42,2	82,2	40	1,15	0,9	1,04	175	1,28	40	135
10	42,2	82,2	40	1	1	1,00	175	1,00	40	135
11	42,2	82,2	40	0,75	1,25	0,94	175	0,60	40	135
12	42,2	82,2	40	0,45	1,5	0,68	175	0,30	40	135
13	42,2	82,2	40	0	1,8	0,00	175	0,00	40	135
$R_{\text{ideální zátěže}}$								1,23	η [%]	0,77

Tabulka závislosti maximálního výkonu P_{\max} na rozdílu teplot:

Hodnoty maximálního výkonu jsou vybrány z všech naměřených tabulek, které jsou uloženy v příloze č.1 a zde jsou v závislosti na teplotě. V tabulce je dále vstupní tepelný výkon, jednotlivé teploty, napětí a proud při daném výstupním maximálním výkonu, ideální vstupní odpor a účinnost.

Tab. 5-2 Tabulka závislosti maximálního výkonu na rozdílu teplot

ΔT	$P_{\text{MaxVýstupní}}$	$P_{\text{vstupní}}$	T_1	T_2	U	I	$R_{\text{ideální}}$	η
[°C]	[W]	[W]	[°C]	[°C]	[V]	[A]	[Ω]	[%]
2	0,00175	6	21,5	23,5	0,035	0,05	0,7	0,029
5	0,025	17	23,8	28,8	0,125	0,2	0,63	0,147
10	0,063	30	26,6	36,6	0,25	0,25	1	0,21
20	0,33	76	35,3	55,3	0,6	0,55	1,09	0,43
30	0,53	90	38	68	0,89	0,6	1,48	0,59
40	1,04	135	42,2	82,2	1,15	0,9	1,28	0,77
50	1,65	175	51,7	101,7	1,5	1,1	1,36	0,94
60	2,45	195	61,2	121,2	1,75	1,4	1,25	1,26
70	2,76	230	70	140	2,3	1,2	1,92	1,2
80	3,45	270	72	152	2,3	1,5	1,53	1,28
100	4,65	390	93	193	3,1	1,5	2,07	1,19

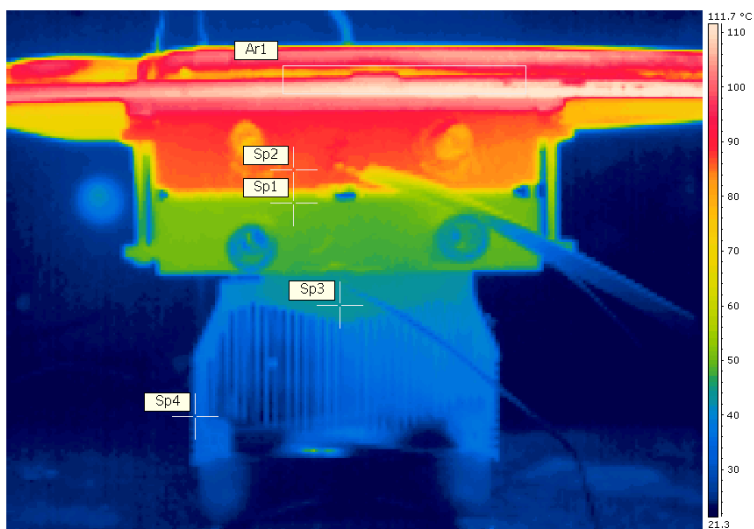
Tabulka závislosti účinnosti a maximálního výkonu dodávaného termobateriemi na rozdílu teplot:

Tab. 5-3 Tabulka závislosti účinnosti a maximálního výkonu na rozdílu teplot

ΔT	η	$P_{\text{MaxVýstupní}}$
[°C]	[%]	[W]
2	0,029	0,00175
5	0,147	0,025
10	0,21	0,063
20	0,43	0,33
30	0,59	0,53
40	0,77	1,04
50	0,94	1,65
60	1,26	2,45
70	1,2	2,76
80	1,28	3,45
100	1,19	4,65

Snímky z rozložení teplot při měření pořízeny termokamerou:

Výměník s termobateriemi a chladič je nastříkán emisí barvou, takže teploty se budou velice blížit pravdivým hodnotám, avšak povrch topného elementu je lesklý, proto se na něm mohou teploty značně lišit.



Obr. 5-12 Snímek z termokamery pro rozdíl teplot $\Delta T = 40^\circ\text{C}$

Hodnoty teplot označených bodů:

Ar1 Min 72,3 °C Max 113,6 °C Average 100,7 °C

Sp1 49,8 °C

Sp2 85,3 °C

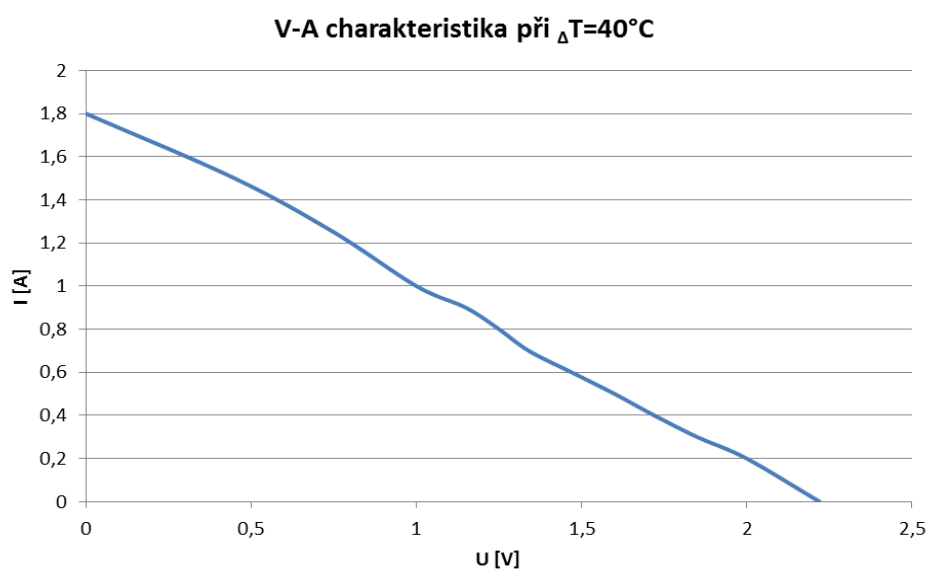
Sp3 42,6 °C

Sp4 33,6 °C

Grafy charakteristik termobaterií:

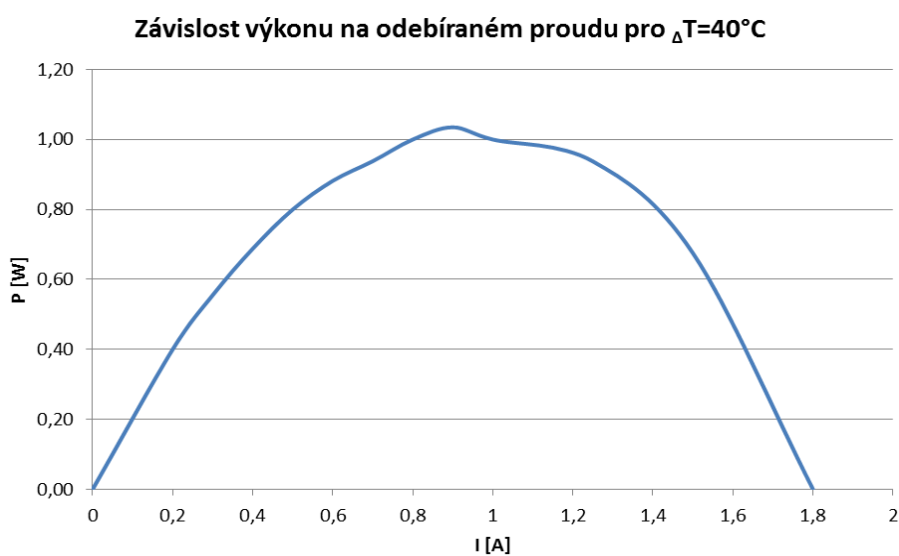
Charakteristické grafy vlastnosti termobaterií při jedné teplotě:

První série grafů je zaměřena na tabulku naměřených hodnot pro rozdíl teplot $\Delta T = 40^\circ\text{C}$. Tento rozdíl teplot je vybrán, protože v praxi by byly tyto články při využívání odpadního tepla provozovány přibližně v tomto rozdílu teplot. Grafy pro jiné rozdíly teplot budou mít podobný tvar, pouze hodnoty se budou měnit, proto jsem vytvořil pouze grafy pro jeden rozdíl teplot.



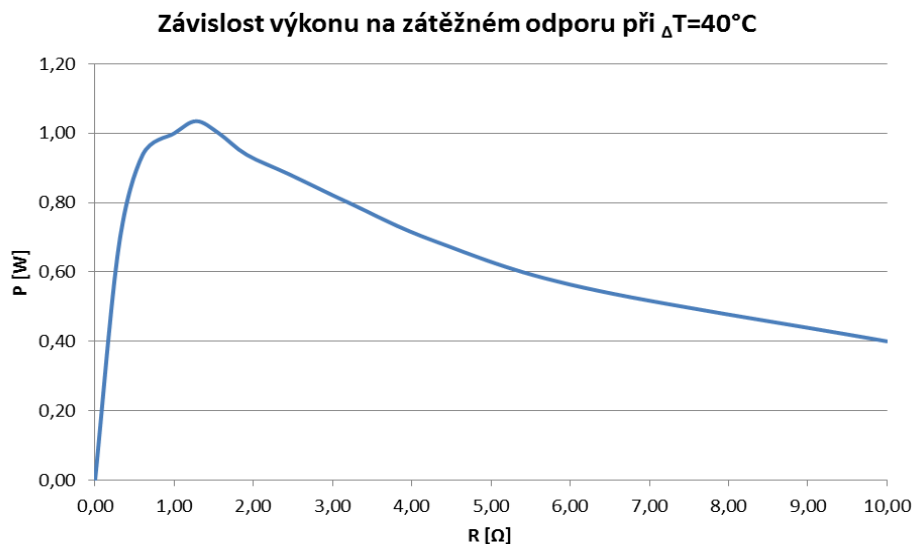
Obr. 5-13 V-A charakteristika při $\Delta T = 40^\circ\text{C}$

Z VA charakteristiky můžeme vyčíst, že vnitřní odpor termobaterií je nezávislý na zátěži.



Obr. 5-14 Závislost výkonu na odebíraném proudu pro $\Delta T = 40^\circ\text{C}$

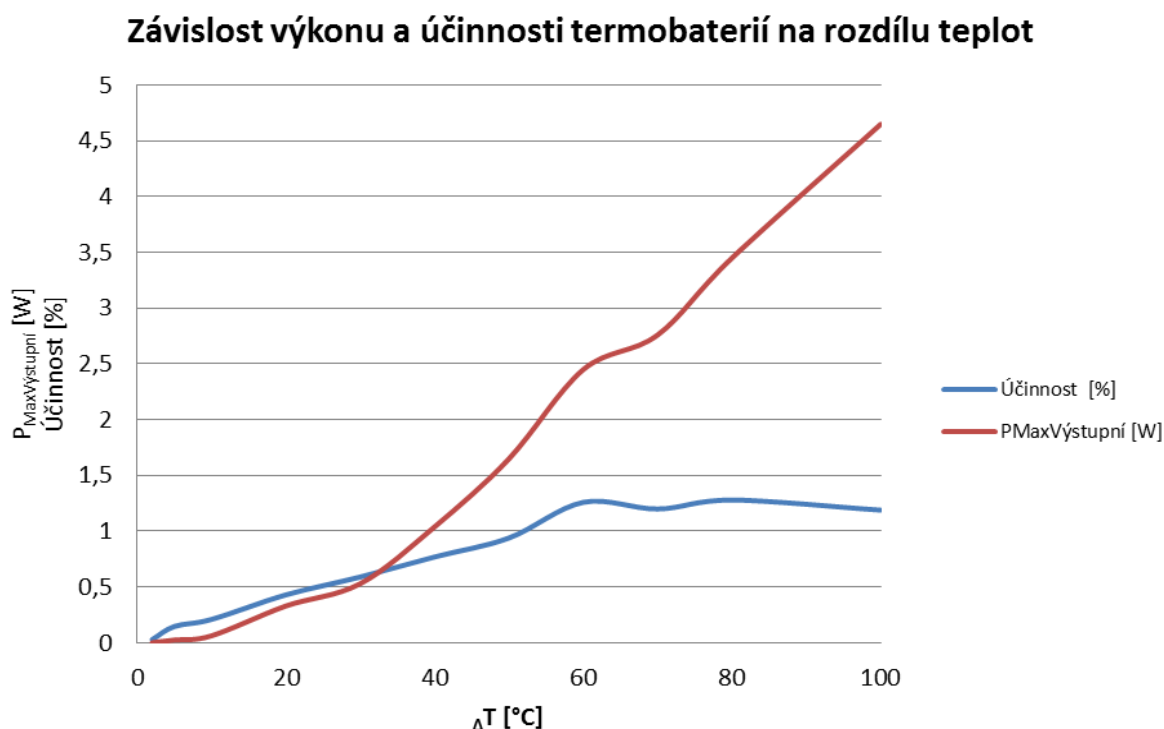
Z grafu závislosti výkonu na odebíraném proudu lze nejlépe vyčíst, proč je určován ideální zátěžný odpor. Ideální bod, kdy termobaterie přeměňuje největší množství tepla na elektrickou energii je v maximu na tomto grafu. Je vidět, že maximum je přibližně v polovině proudu nakrátko a tedy i z lineární VA charakteristiky můžeme odvodit, že je to v polovině výstupního napětí naprázdno. Takto lze vypočíst jednoduše hodnotu ideální zátěže pro praktické využívání termobaterií.



Obr. 5-15 Závislost výkonu na zátěžném odporu při $\Delta T = 40^\circ\text{C}$

V grafech je vidět nerovnosti křivek a to hlavně v okolí maximálního výkonu, což je způsobeno nepřesnostmi měření.

Výsledný graf závislosti výkonu a účinnosti teplot na rozdílu teplot:



Obr. 5-16 Závislost výkonu a účinnosti termobaterií na rozdílu teplot

Z grafu je vidět, že výkon při malých rozdílech teplot má snahu narůstat exponenciálně, avšak projeví se účinek vnitřního odporu a od rozdílu 30°C roste výkon přibližně lineárně. Účinnost roste zpočátku lineárně avšak asi u rozdílu teplot 50°C začíná klesat růst křivky a účinnost se pohybuje kolem 1,2%. Klesání růstu účinnosti bude pravděpodobně způsobeno vlastností materiálu termobaterií složených z Bismutu a Telluru. Účinnost termobaterií složených z těchto materiálu ukazuje takzvaný ZT parametr, který můžete vidět výše na Obr. 5-1.

Z grafu ZT parametru lze vidět, že největší účinnost mají termobaterie z Bismutu a Telluru při teplotě 250 až 300K, což je asi -23 až 27°C, tedy při pokojové teplotě. Ideální by bylo tedy střední teplotu udržovat na této teplotě. Avšak díky ohřívání chladiče střední teplota roste až na 150°C, účinnost se už citelně snižuje, což je vidět na snižování růstu křivky účinnosti v grafu závislosti výkonu a účinnosti na rozdílu teplot.

Závěr z měření TEG2-12610-5.1:

Toto měření splnilo svůj účel a ukázalo reálnou účinnost termobaterie TEG2-12610-5.1, která se pohybuje u teplot pro využívání odpadního tepla v hodnotách kolem 1%. Dále z měření vyplývá závislost generovaného výkonu na rozdílu teplot na termobateriích. Další důležité hodnoty jsou vnitřní odpor termobaterií, vstupní výkon při určitých rozdílech teplot a ideální odběrové napětí a proud pro různé teploty.

Měření proběhlo bez problému, odchylky naměřených hodnot jsou v normě a odpovídají předpokládaným vlastnostem termobaterií. Avšak výrobcem udávané účinnosti jsou o něco vyšší, než které jsem naměřil, což je důležitý poznatek pro reálné využívání termobaterií v praxi, kvůli jejich ekonomické návratnosti.

Snímky s termokamery mají malé odchylky teplot na rozdíl od teplot naměřených dataloggerem, to může být způsobeno jak nečistotami na povrchu emisní barvy, tak samotným principem měření termokamerou, který je do jisté míry nepřesný.

Podobné měření tohoto výměníku jsem prováděl v domácích podmínkách a výsledky jsou uloženy na mých webových stránkách <http://hawelson.blog.cz/0902/spalovak-2-2> [35].

5.3.2 Měření TEG1-12610-5.1

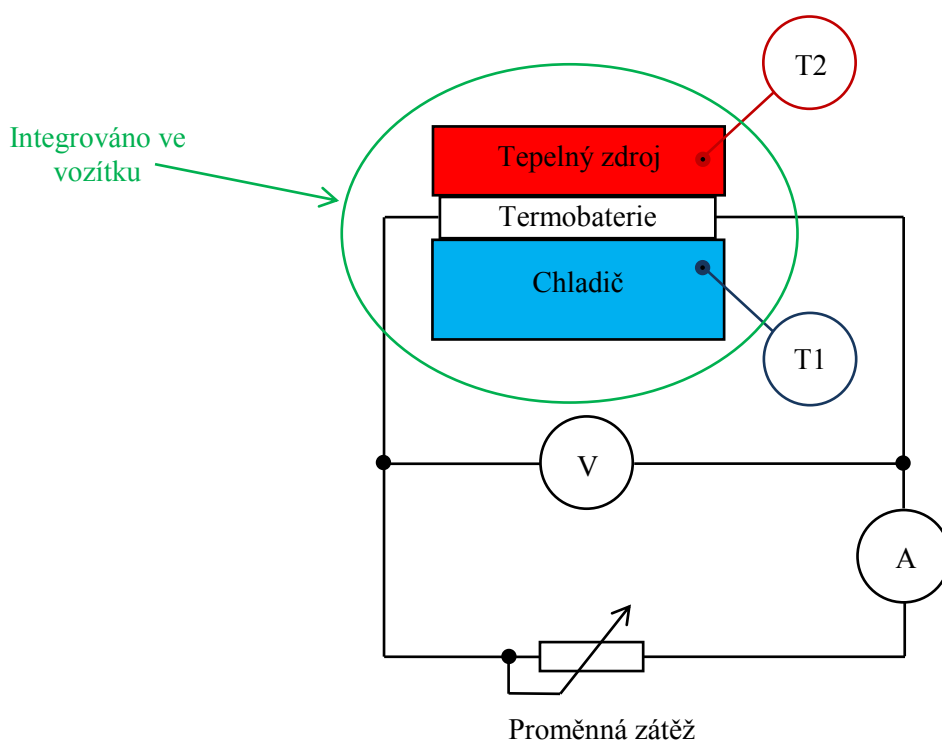
Konkrétně měření Peltierové termobaterie TEG1-12610-5.1 použité v demonstračním vozítku „Spalovák 2“. Celý protokol z tohoto měření je umístěn v příloze č.2. V celém bodě 8.2 jsou vybrány pouze nejdůležitější informace z měření.

Postup měření:

- 1) Zapojit schéma pro měření.
- 2) Zapálit zdroj tepla ve vozítku a počkat až se rozdíl teplot na termobaterii ustálí.
- 3) Vytvořit snímek termokamerou a odečíst teploty na stranách termobaterie.
- 4) Provést měření VA-charakteristiky termobaterie.
- 5) Z měření nakrátko určit vnitřní odpor termobaterie.
- 6) Určit výkon termobaterie z VA-charakteristiky při měření se zátěžemi blízkými vnitřnímu odporu termobaterie a určit ideální zátěž (zátěž u které generuje termobaterie nejvyšší výkon).

Schéma zapojení pro měření TEG1-12610-5.1:

Schéma pro měření termobaterie TEG1-12610-5.1 se skládá z tepelného zdroje, samotný termobaterie a chlazení. Celá tato část je integrovaná v demonstračním vozítku Spalovák 2, které jsem pro tento účel vyrobil. Ve vozítku je použit typ termobaterie TEG1 kvůli její větší tepelné odolnosti, to je však vykoupeno nižší účinností přeměny tepelné energie na energii elektrickou. Teplota horké i chladné strany je měřena teplotním dataloggerem s termočlánkovými čidly (T1 a T2). Termobaterie se chová jako zdroj elektrické energie s určitým vnitřním odporem a proto je třeba nalézt ideální zátěž pro co největší potenciál využití elektrické energie. Jako proměnná zátěž je použit reostat s relativně nízkým odporem (16Ω). Výkon termobaterie je měřen pomocí voltmetru (V) a ampérmetru (A). Voltmetr je připojen přímo na výstup termobaterie a to kvůli správnosti měření, kdy vznikne zanedbatelný úbytek napětí na ampérmetru. V tomto zapojení se ampérmetr chová jako malý odpor v sérii s reostatem, což nevnáší do měření chybu metody.

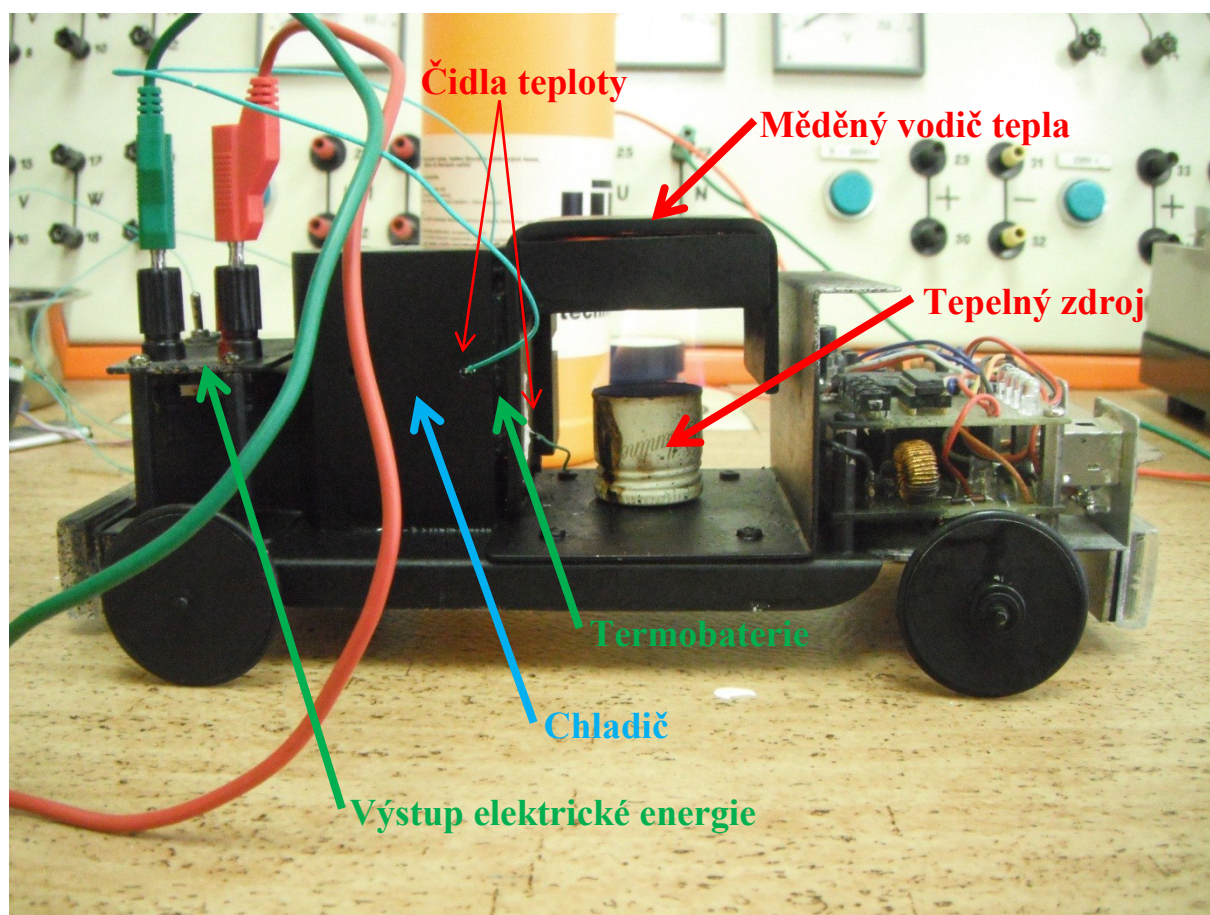


Obr. 5-17 Schéma zapojení pro měření TEG2-12610-5.1

Vzhled reálného zapojení:

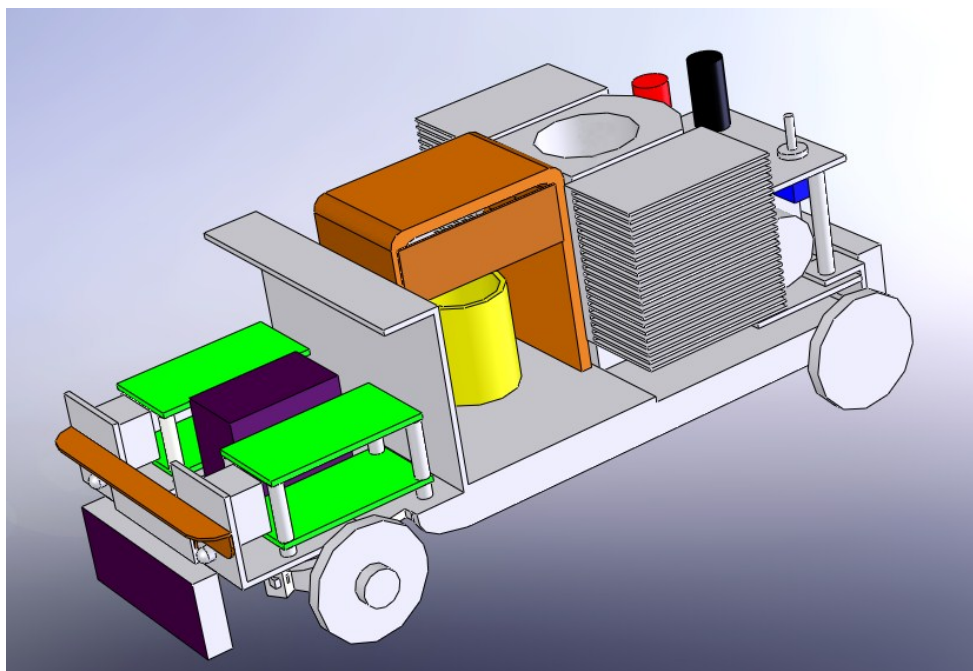
Vozítko Spalovák 2 jsem vytvořil jako demonstrační vozítko možnosti využití Sebeckova jevu, čili přeměny tepelné energie přímo na energii elektrickou. Vozítko se skládá ze zdroje energie, ve kterém je lihový kahan jako zdroj tepla, měděného tepelného vodiče, který přivádí teplo na termobaterii, termobaterie samotné a chladiče. Vozítko má přepínač, který umožňuje přepnutí mezi možností napájení samotného vozítka, které se inteligentně pohybuje v prostoru díky integrovaného mikropočítače. Měření termobaterie ve vozítku je zapojeno dle schématu výše.

Vozítko je vyrobeno převážně z hliníku a před tímto měřením mělo i charakteristickou barvu lesklého hliníku. Avšak pro toto měření bylo potřeba vozítko nastříkat emisní barvou, pro přesnost teploty snímků z termokamery. Dále je na fotografii vidět samotný chladič, na místě chladiče byl předtím přišroubován ještě žebrový chladič, pro zlepšení odvodu tepla, ten byl sundán a žebrový chladič na vozítku zůstal jen z druhé strany (na této fotografii ho není moc vidět).



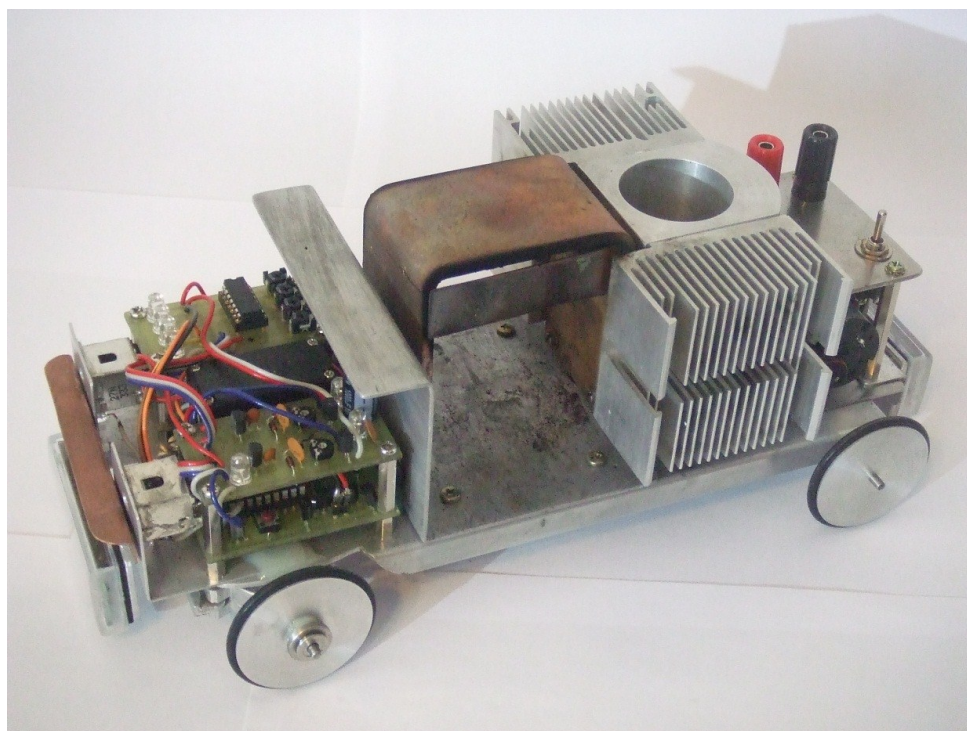
Obr. 5-18 Reálné měření termobaterie ve vozítku „Spalovák 2“:

3D model vozítka Spalovák 2:



Obr. 5-19 3D model vozítka Spalovák 2

Reálný vzhled vozítka Spalovák 2 před úpravou pro měření:



Obr. 5-20 Reálný vzhled vozítka Spalovák 2 před úpravou pro měření

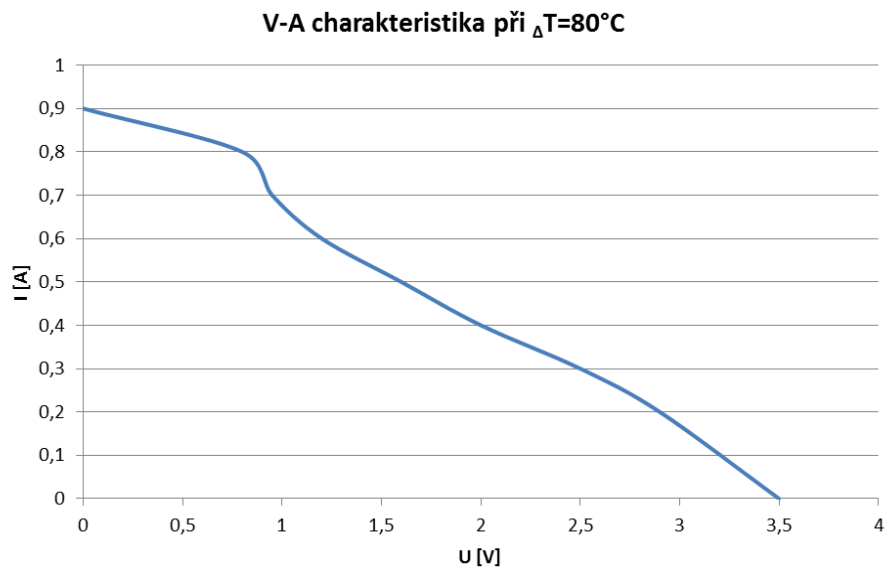
Tabulka naměřených a vypočtených hodnot:

Měření bylo prováděno při okolní teplotě 20°C a vlhkosti 46%.
Tabula je vytvořena pro rozdíl teplot 80°C – teplota horké strany je 180°C a chladné strany 100°C. Tabulka obsahuje naměřené teploty, vypočtený rozdíl teplot. Naměřené napětí a proudy pro různé zátěže a červeně vyznačený řádek pro ideální zátěž, kdy je výstupní výkon nejvyšší. Výkon termobaterie je také vypočten. Jako poslední hodnota v tabulce je vypočten odpor zátěže. Pod tabulkou je vypočten a červeně vyznačen ideální odpor zátěže ($R_{\text{ideální zátěže}}$).

Tab. 5-4 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro TEG2-12610-5.1

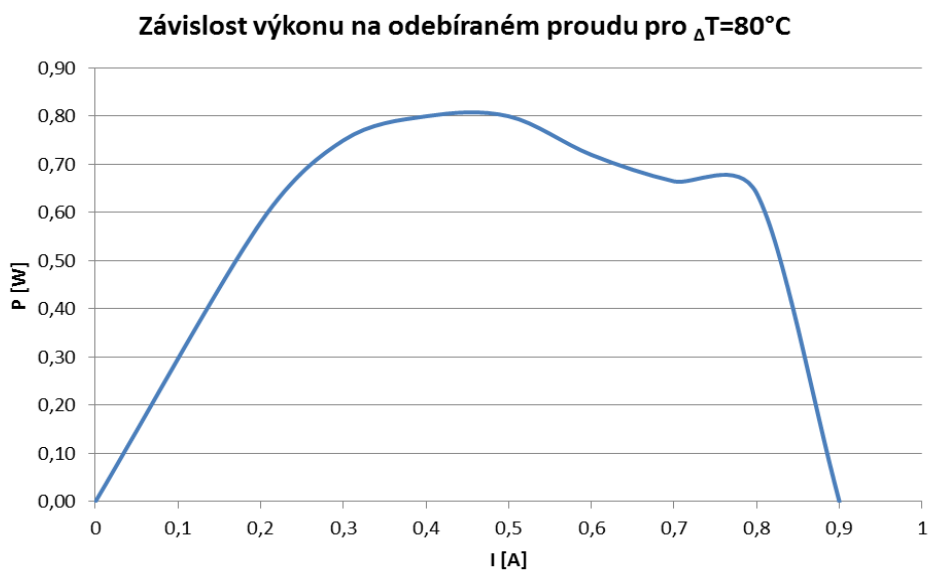
Zátěž č.	T_1	T_2	ΔT	U	I	$P_{\text{výstupní}}$	$R_{\text{zátěže}}$
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[V]	[A]	[W]	[Ω]
1	100	180	80	3,5	0	0,00	naprázdno
2	100	180	80	2,9	0,2	0,58	14,50
3	100	180	80	2,5	0,3	0,75	8,33
4	100	180	80	2	0,4	0,80	5,00
5	100	180	80	1,6	0,5	0,80	3,20
6	100	180	80	1,2	0,6	0,72	2,00
7	100	180	80	0,95	0,7	0,67	1,36
8	100	180	80	0,8	0,8	0,64	1,00
9	100	180	80	0	0,9	0,00	0,00
						$R_{\text{ideální zátěže}}$	3,89

Grafy charakteristik termobaterie:



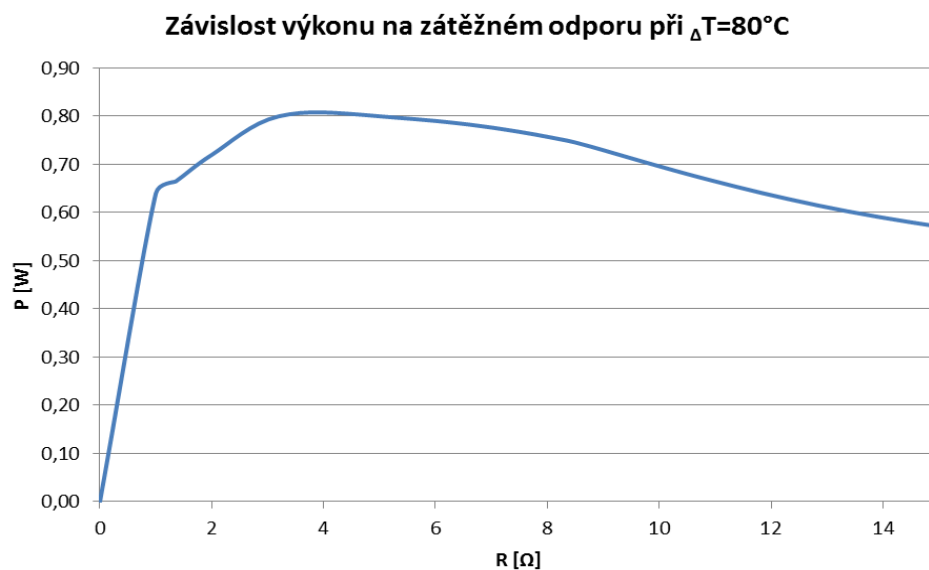
Obr. 5-21 V-A charakteristika při $\Delta T = 80^\circ\text{C}$

V-A charakteristika by měla být lineární, její úskok u 1 V bude způsoben nepřesností měření a změnou teploty při měření.



Obr. 5-22 Závislost výkonu na odebíraném proudu pro $\Delta T = 80^\circ\text{C}$

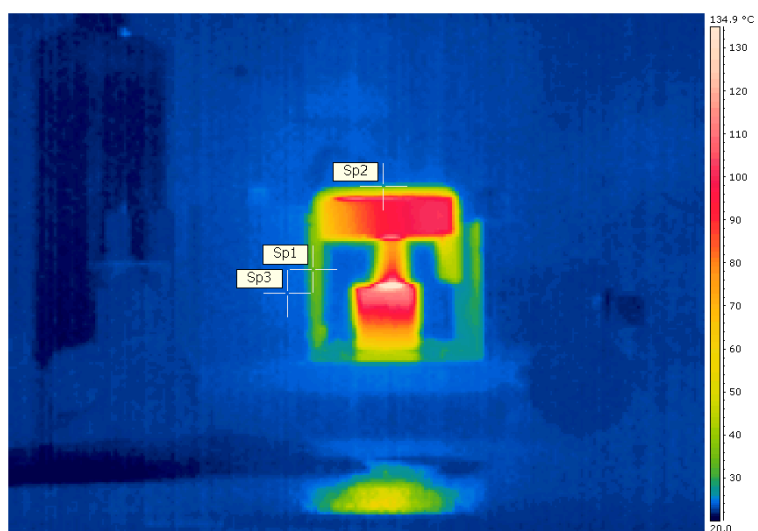
U závislosti výstupního výkonu na odebíraném proudu lze vidět tentýž úskok, křivka by měla být parabolická. Z grafu je zřejmé, proč je důležité přizpůsobení odběru – vložení ideální zátěže.



Obr. 5-23 Závislost výkonu na zátěžném odporu při $\Delta T = 80^\circ\text{C}$

Na grafu závislosti výstupního výkonu na zátěžném odporu je opět vidět, proč je důležité vytvoření ideální zátěže.

Snímky z rozložení teplot při měření pořízeny termokamerou:



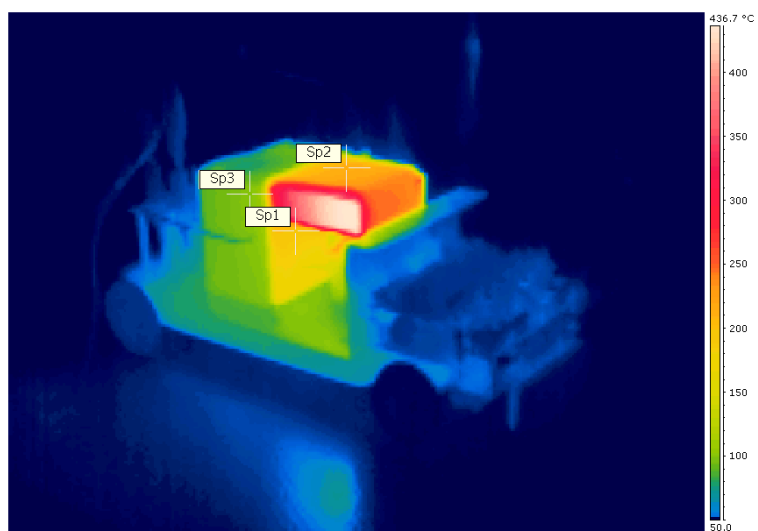
Obr. 5-24 Snímek rozehtřívajícího se vozítka

Hodnoty teplot označených bodů:

Sp1 35,0 °C

Sp2 44,9 °C

Sp3 23,8 °C



Obr. 5-25 Snímek vozítka při teplotách měření:

Hodnoty teplot označených bodů:

Sp1 190,3 °C

Sp2 212,9 °C

Sp3 100,2 °C

Závěr z měření TEG1-12610-5.1:

Toto měření bylo zaměřeno na porovnání účinnosti generování elektrické energie z tepelné na velikosti samotné termobaterie. Měření, které jsem prováděl u TEG2-12610-5.1 (nizkoteplotní termobaterie) a srovnání s tímto měřením u vozítka Spalovák 2 s termobaterií TEG1-12610-5.1 (vysokoteplotní termobaterie) je vidět, že termobaterie TEG1-12610-5.1 generuje při rozdílu teplot 80°C maximální výkon kolem 0,8W, za což termobaterie TEG2-12610-5.1 generuje 1,725W (toto číslo je děleno dvěma, protože u měření výměníku byly termobaterie dvě).

Je také vidět, že vnitřní odpor je přibližně roven ideálnímu odporu zátěže. U termobaterie TEG1-12610-5.1 je vnitřní odpor mnohem vyšší, kolem 4 Ohmů, za což u TEG2-12610-5.1 se vnitřní odpor pohyboval kolem 0,8 Ohmu.

Snímky s termokamery mají odchylky teplot na rozdíl od teplot naměřených dataloggerem, to může být způsobeno jak nečistotami na povrchu emisivní barvy, tak samotným principem měření termokamerou, který je do jisté míry nepřesný.

Podrobnější informace o tomto vozítku lze nalézt na mých stránkách <http://hawelson.blog.cz/0902/spalovak-2> [36].

6. Návrh využití TEG termobaterií v energetice

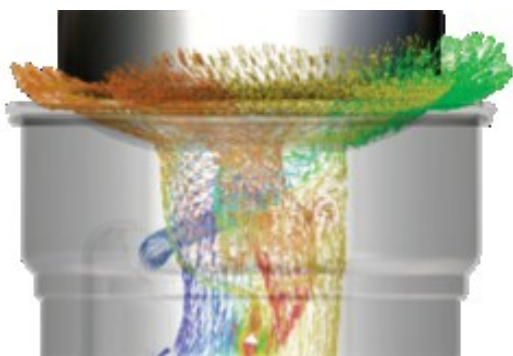
6.1 Využití TEG termobaterií jako malého zdroje elektrické energie

Začínají se pomalu vyvíjet reálné aplikace využívající TEG termobaterie. Například firma BioLite (<http://www.biolitestove.com>) [29] ve spolupráci s Aprovecho Research Center, vyvinula jako první na světě straně kamna na dřevo s 95% snížením obsahu kouře, které vyrábějí během svého provozu nejen teplo, ale i elektrickou energii.



Obr. 6-1 Kamna dřevo s TEG termobateriemi

Tato kamna chce firma BioLite nasadit hlavně do zemí třetího světa. Prototyp testovala v Guatemale u venkovské komunity. Konkrétně u rodiny, která vaří z několika tun dříví ročně. Odezva byla velice pozitivní, nejen v možnosti výroby elektrické energie při vaření pro malé přístroje, např. pro nabíjení mobilního telefonu, ale i v úspoře dřeva díky konstrukci kamen.



Obr. 6-2 Model tepelného proudění v kamnech



Obr. 6-3 Rodina z Guatemaly s kamny

V Guatemale tuto pec používali hlavně pro nabíjení mobilních telefonů a pro napájení LED světla. Kamna produkují 1 až 2W elektrické energie, tedy zcela dostačují pro takovéto malé spotřebiče elektrické energie.



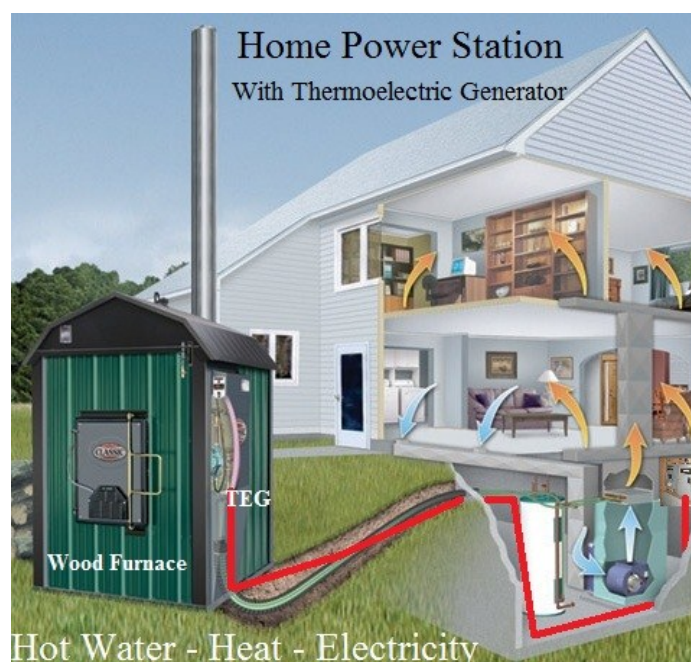
Obr. 6-4 Nabíjení mobilního telefonu a napájení LED světla pecí

Firma už vyvinula další TEG pec, konkrétně pro camping. Pec nespaluje propan ani jiné látky dostupné pouze v civilizovaném světě, ale spaluje větvičky, šišky, pelety, plevy a podobně. Campingová pec rozpálí oheň do plného výkonu za 2 minuty a uvaří 1 litr vody za 4 minuty, navíc je jí možné složit pro snadný přenos. Výška pece je pouze 19cm, průměr 11,5cm a váha 500 gramů.



Obr. 6-5Campingová pec s TEG termobateriemi

Nad větším projektem využívajícím TEG termobaterie pracuje firma TEG Power (<http://www.tegpower.com/>) [30], která uvažuje nad výrobou pecí na dřevo s integrovaným TEG generátorem o výkonu 50 až 5000W. Pec tedy bude produkovat nejen teplo pro domácnost, ale zároveň i dostatek elektrické energie. Další výhodou je téměř 100% účinnost takového modelu, protože jako chladič TEG se použije voda pro ohřev domácnosti. Takto všechno teplo, které projde termobateriemi bez přeměny na elektrickou energii se využije pro ohřev. Pec, která je vyobrazena na obrázku níže má výkon 12kWh/den.



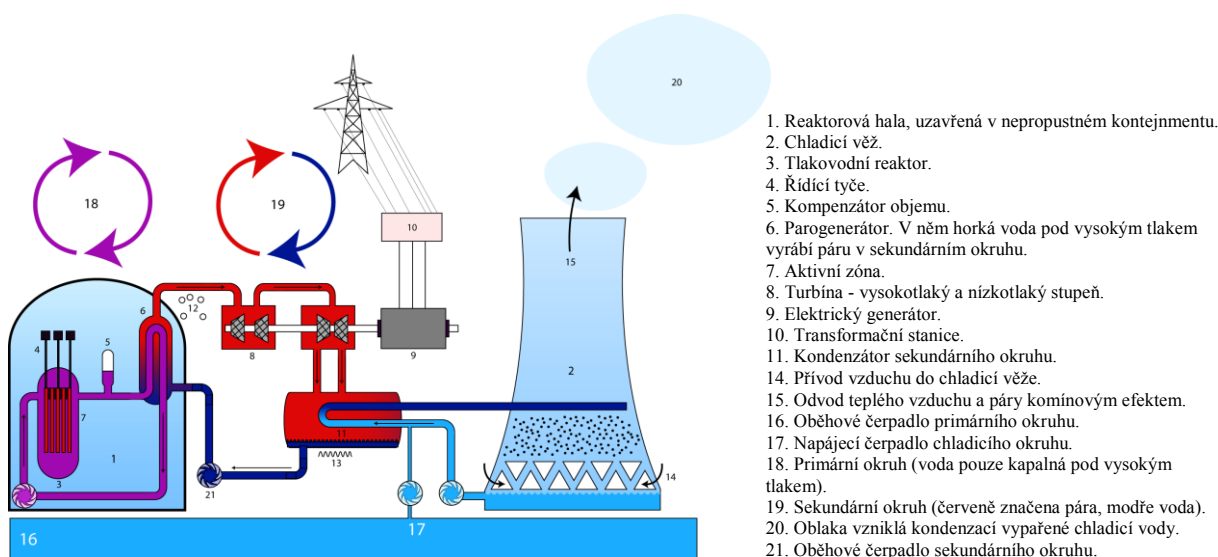
Obr. 6-6 Pec pro výrobu tepla a elektrické energie

6.2 Návrh využití TEG termobaterií pro odpadní teplo z elektráren

Vezměme jako příklad jadernou elektrárnu Temelín. Tepelný výkon jednoho bloku je 3000MW a na elektrickou energii se přemění pouze 981MW, účinnost přeměny je tedy kolem 33%. Při provozu dvou bloků projde přes chladicí věže do atmosféry ve formě odpadního tepla asi 4000 MW. To znamená že 4GW tepelné energie jsou zcela nevyužity. Při použití TEG generátoru by se část této tepelné energie mohla využít a tím pádem by se zvýšila účinnost elektrárny.

Cílem měření v této práci bylo změřit reálnou účinnost termobaterií a navrhnout termoelektrický generátor pro využívání odpadního tepla, které se nyní bezúčelně vypouští do atmosféry z chladících věží.

Blokové schéma jaderné elektrárny můžete vidět na obrázku níže. [32]

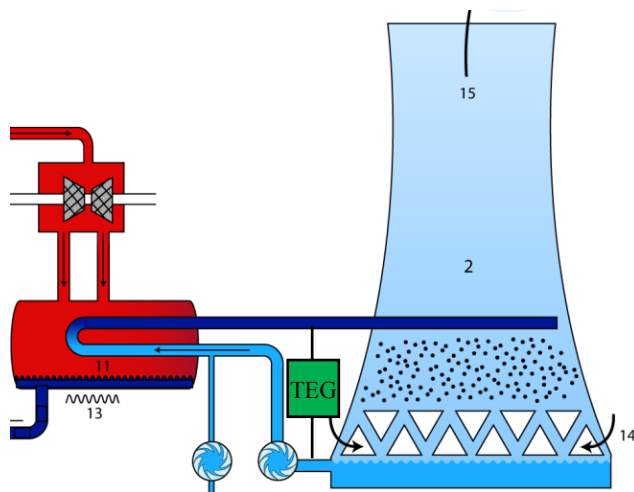


Obr. 6-7 Blokové schéma jaderné elektrárny

Navrhl jsem dva řešení jak využít odpadní teplo proudící do chladících věží, které popisují v bodech níže.

6.2.1 Umístění TEG generátoru paralelně ke chladicí věži

První a nejlevnější možnost umístění termobaterií by bylo paralelně k chladicí věži, tedy mezi přívod a odvod tepla do chladicí věže.



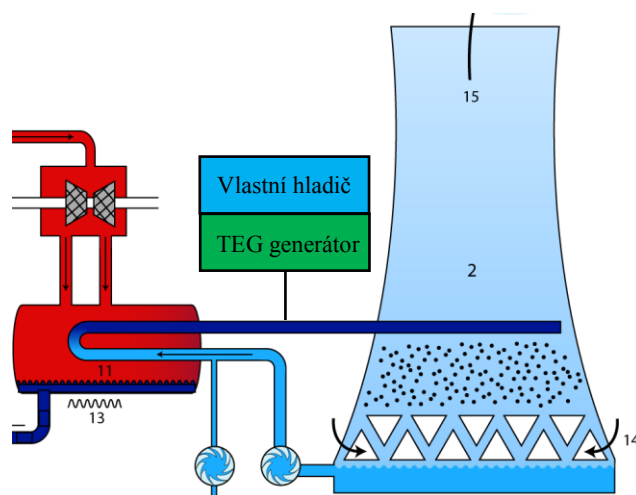
Obr. 6-8 Umístění TEG generátoru paralelně k chladicí věži

Takovéto uspořádání by však mělo velice negativní důsledek na účinnost elektrárny. Například v letních obdobích kdy poroste jen o pár stupňů celsia teplota ochlazené vody chladicí věže (ze 14-17°C na 23°C) klesne výkon 1GW bloku elektrárny o 10MW. [33]

Vložením termobaterií do tohoto místa by tedy způsobilo ohřívání vracející se vody a tedy i velké snížení účinnosti elektrárny. Toto snížení by bylo mnohem vyšší než energie vytvořená termobateriemi.

6.2.2 TEG generátor s vlastním chladičem

Druhá možnost je dát termobateriím vlastní chladič. V tomto případě bude využíváno opět teplo vstupující do chladicí věže, avšak díky vlastnímu chladiči se nebude zvyšovat výstupní teplota vody z chladicí věže, ale právě naopak. Celkově dosáhneme tedy dvojitého zvýšení účinnosti.



Obr. 6-9 TEG generátor s vlastním chladičem

Čím vyšší teploty dosáhneme na vstupu do TEG generátoru, tím vyšší bude jeho účinnost, proto by bylo možno i zvažovat oddělený výstup z kondenzátoru nebo umístění TEG generátoru přímo na kondenzátor.

Tato možnost by byla mnohem nákladnější kvůli stavbě vlastního chladiče, avšak odhadem cena chladiče s celým vybavením by neměla převýšit cenu samotných termobaterií.

6.2.3 Výpočet výkonu a návratnosti TEG generátoru v elektrárně

Tento výpočet je zaměřen konkrétně na jadernou elektrárnu Temelín. Ztrátový výkon elektrárny je 4GW. Vyráběný výkon ve formě elektrické energie je 2GW.

Účinnost přeměny:

Účinnost přeměny tepelné energie na elektrickou v TEG generátoru by závisel hlavně na teplotě vstupní vody. Předpokládejme, že tato teplota by se pohybovala kolem 80°C a teplota okolí by se průměrně pohybovala kolem 10°C. Celkově bude tedy rozdíl teplot 70°C, pokud však budeme brát ohled na ztráty v přestupu tepla v chladiči a ve výměníku k TEG termobateriím, bude celkový rozdíl teplot odhadem 40°C. Z měření termobaterií TEG2-12610-5.1 vyplývá, že účinnost přeměny tepelné energie na elektrickou se při tomto rozdílu teplot pohybuje kolem 0,7%. Termobaterie TEG2-12610-5.1 však nejsou nejúčinnější a tedy předpokládejme účinnost 1%.

Dovolené ochlazení vody při průchodu termobateriemi předpokládejme na 25% maximálního rozdílu teplot. Celkovou tepelnou energii z 25% odpadního tepla, která by se takto získala předpokládejme na 1GW.

Výsledný výkon:

Výkon jedné termobaterie za cenu 10 USD se pohybuje u rozdílu teplot 40°C kolem 0,5W. K realizaci 10MW TEG generátoru by tedy bylo potřeba 20 000 000 kusů termobaterií. Cena za termobaterie by se tedy pohybovala kolem 200 000 000 USD, což je v přepočtu asi 3 400 000 000Kč. Cena chladičů a dalšího vybavení by se pohybovala přibližně ve stejné cenové relaci. Předpokládejme tedy celkové náklady 7 000 000 000Kč

Návratnost:

Při účinnosti přeměny 1% je možno z takového TEG generátoru umístěném v jaderné elektrárně Temelín získat výkon 10MW elektrické energie. Cena výkupu elektrické energie od jaderných elektráren se pohybuje okolo 0,60Kč/kWh, předpokládejme tedy tuto cenu pro výpočet. [34]

Denně vyrobí TEG generátor $24\text{h} \times 10\text{MW} = 240\text{MWh}$ elektrické energie. V přepočtu na finance je to $240\,000\text{kWh} \times 0,60\text{Kč/kWh} = 144\,000\text{Kč/den}$. Ročně pak $144\,000\text{Kč} \times 365\text{ dnů} = 52\,560\,000\text{Kč/rok}$.

Návratnost by tedy byla při výkupní ceně 0,60Kč/kWh $7\,000\,000\,000\text{Kč} / 52\,560\,000\text{Kč/rok} = 133\text{ let}$. Pokud by byl výpočet prováděn s prodejní cenou elektrické energie, která se pohybuje nyní kolem 5Kč, návratnost by byla již $133\text{let} \times 0,60\text{Kč} / 5\text{Kč} =$ což je asi 16 let. Se zvyšující cenou elektrické energie by návratnost mohla být ještě rychlejší. Navíc by se ještě zvýšila účinnost elektrárny díky chladnější vstupní teplotě vody do chladičích věží.

7. Závěr

Lze vidět, že termoelektrické články se jako zdroj energie využívají již velmi dlouho, v podstatě již od počátku objevení termoelektrických jevů. Termoelektrické zdroje se používaly většinou jako velice malý zdroj o malém výkonu. Z počátku vývoje se účinnost přeměny tepelné energie na elektrickou pohybovala velice nízko a proto se tyto zdroje využívaly jako buď malý zdroj anebo jako zdroj energie tam, kde nebyla dostupná elektrická energie ze sítě a bylo potřeba zajistit dlouhodobý spolehlivý zdroj energie. S postupem času se vývoj termoelektrických materiálů posunul a také jejich účinnost se zvýšila. Nyní jsou termoelektrické zdroje energie (RTG) použity i v mnoha sondách v kosmu, z nichž jsou nejznámější Voyager 1 a Voyager 2, které jsou již tak vzdáleny od slunce, že by jim už nestačilo sluneční osvětlení pro napájení sondy skrz solární články. RTG využívají teplo generované rozpadem radioaktivních částic a toto teplo se následně přeměňuje termoelektrickými bateriemi na elektrickou energii. Takovéto generátory nejsou využity pouze v kosmu ale i na odlehlých místech na zemi.

V této práci upozorňuji na vývoj termoelektrických baterií typu TEG v poslední době, hlavně na zvýšení jejich účinnosti. Provádím měření reálných termobaterií, kde se zaměřuji hlavně na jejich účinnost a množství vygenerované elektrické energie z určitého rozdílu teplot. Z měření vyplývá, že jejich nynější účinnost přeměny tepelné energie na elektrickou, při využívání odpadního tepla je kolem 1% u měřených termobaterií a u kvalitnějších termobaterií by se tato hodnota mohla pohybovat kolem 2%. Vytvořil jsem také demonstrační vozítko „Spalovák2“, které je napájeno termoelektrickou baterií a tak demonstruje možnost opravdu reálného využití těchto termobaterií.

Dále navrhuji využití termoelektrického generátoru v jaderných nebo tepelných elektrárnách k využívání obrovského množství tepla, které nyní většinou vypouštíme bez užítku do atmosféry. Při propočtu návratnosti investice do takového generátoru při výkupních cenách elektrické energie od jaderných elektráren je tato návratnost velice dlouhá. Avšak pokud budeme počítat návratnost z prodejní ceny elektrické energie koncovému zákazníkovi, návratnost se sníží na přibližných 10 až 20 let. Nyní dělají vědci velké pokroky ve vývoji nanomateriálů s výjimečnými termoelektrickými vlastnostmi.

V dnešní době je tedy využití termoelektrických generátorů u odpadního tepla, které vytváří malé rozdíly teplot, zatím neekonomické. Budoucnost však bude přinášet nové možnosti a budeme čím dál více potřebovat elektrickou energii ke svému životu, proto do budoucna bude možná standardem využívání odpadního tepla touto formou.

Použitá literatura:

- [1] Teplota [online]. [22. října 2010]. Dostupné z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Teplota>
- [2] Termoelektrický jev [citováno online]. [22. října 2010]. Dostupné z WWW:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Termoelektrick%C3%BD_jev
- [3] Termočlánek [online]. [22. října 2010]. Dostupné z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Termo%C4%8Dl%C3%A1nek>
- [4] Termoelektrické jevy [citováno online]. [22. října 2010]. Dostupné z WWW:
http://moon.felk.cvut.cz/~pjv/Jak/_phys/f577/start.html
- [5] Bismut [online]. [30. října 2010]. Dostupné z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Bismut>
- [6] Tellur [online]. [30. října 2010]. Dostupné z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Tellur>
- [7] Selen [online]. [30. října 2010]. Dostupné z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Selen>
- [8] Peltierovy články [online]. [29. listopadu 2010]. Dostupné z WWW:
<http://www.gme.cz/cz/elektronicke-soucastky/peltierovy-clanky/142951691.html>
- [9] TEG thermoelectric power module selection [online]. [29. listopadu 2010]. Dostupné z WWW:
http://www.espressomilkcooler.com/teg_thermoelectric_power_module_selection.htm
- [10] Hi-Z Thermoelectric Modules [online]. [29. listopadu 2010]. Dostupné z WWW:
<http://www.hi-z.com/products.php>
- [11] Power generators [online]. [29. listopadu 2010]. Dostupné z WWW:
<http://www.marlow.com/power-generators/>
- [12] Thermogeneratoren / Seebeckelemente [online]. [29. listopadu 2010]. Dostupné z WWW:
<http://www.thermalforce.de/de/product/thermogenerator/index.php?uid=13125224d563697278dd6a7f14c26bed&ref=>

- [13] TEG Power Generator & Thermoelectric Generator [online].[30. října 2010]. Dostupné z WWW:
http://www.espressomilkcooler.com/thermoelectric_generator_stationary_generator_teg_.htm
- [14] Module Peltier cascade [online].[29. listopadu 2010]. Dostupné z WWW:
<http://www.ams.de/fr/fr/products/detail/id/1248/>
- [15] GOLAB, František, KAMENČÁK, František. Termoelektrické jevy a jejich užití. Praha : Státní pedagogické nakladatelství, Vydání 1. 1975. 83 s, ISBN 14-655-75.
- [16] Thermoelectric Modules - Custom Peltier Coolers [online].[20. prosince 2010]. Dostupné z WWW: <http://www.ferrotec.com/products/thermal/modules/custom/>
- [17] Tepelný tok [online].[20. prosince 2010]. Dostupné z WWW:
http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=96638&title=tepeln%FD%20tok&s_lang=2
- [18] ZORIN, I.V., ZORINA, Z. Ja. Termoelektričeskije choolodilniki i generatory. Energia: Leningradskoje otdelenie izdatel'stva, Vydání 1. 1973. 136 s, UDK 621.362.
- [19] Thermo-Electric Generators [online].[21. února 2011]. Dostupné z WWW:
<http://www.aqpl43.dsl.pipex.com/MUSEUM/POWER/thermoelectric/thermoelectric.htm>
- [20] Thomas Johann Seebeck [online].[21. února 2011]. Dostupné z WWW:
http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Johann_Seebeck
- [21] Jean Charles Athanase Peltier [online].[21. února 2011]. Dostupné z WWW:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Jean_Charles_Athanase_Peltier
- [22] Radioisotope thermoelectric generator [online].[1. března 2011]. Dostupné z WWW:
http://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator
- [23] Thermoelectrics [online].[1. března 2011]. Dostupné z WWW:
<http://www.thermoelectrics.caltech.edu/>
- [24] Study of Recovery of Waste Heat From the Exhaust of Automotive Engine [online].[5. března 2011]. Dostupné z WWW: <http://ect2007.its.org/system/files/u1/pdf/48.pdf>
- [25] Thermonamic Electronics [online].[15. března 2011]. Dostupné z WWW:
<http://www.thermonamic.com/>
- [26] Elektrina přímo z tepla [online].[28. března 2011]. Dostupné z WWW:
<http://3pol.cz/888-elektrina-primo-z-tepla>

- [27] TE modules datasheets: thermoelectric cooling [online].[28. března 2011]. Dostupné z WWW:
http://www.rmtltd.ru/catalogues/TEC2005_DS.pdf
- [28] Peltierův jev [online].[30. března 2011]. Dostupné z WWW:
<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=911>
- [29] BioLite [online].[30. března 2011]. Dostupné z WWW:
<http://www.biolitestove.com>
- [30] TEG Power [online].[30. března 2011]. Dostupné z WWW:
<http://www.tegpower.com/>
- [31] Jaderná energie a ekologie [online].[30. března 2011]. Dostupné z WWW:
<http://www.ekologie-energie.cz/temelin-dukovany-ekologie.htm>
- [32] Jaderná elektrárna [online].[30. března 2011]. Dostupné z WWW:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_elektr%C3%A1rna
- [33] Temelín kvůli vedrům nestíhá chladit. [online].[5. dubna 2011]. Dostupné z WWW:
http://byznys.lidovky.cz/temelin-kvuli-vedrum-nestiha-chladit-prichazi-o-300-tisic-korun-denne-11m-firmy-trhy.asp?c=A100708_094057_firmy-trhy_nev
- [34] Jaká je tržní cena elektřiny z OZE? [online].[5. dubna 2011]. Dostupné z WWW:
<http://proatom.luksoft.cz/view.php?cislocclanku=2006051201>
- [35] Spalovák 2 [online].[8. dubna 2011]. Dostupné z WWW:
<http://hawelson.blog.cz/0902/spalovak-2-2>
- [36] Spalovák 2 [online].[8. dubna 2011]. Dostupné z WWW:
<http://hawelson.blog.cz/0902/spalovak-2>

Seznam příloh:

- | | |
|-------------|--|
| Příloha č.1 | Měření dvou Peltierových termobaterií TEG2-12610-5.1 |
| Příloha č.2 | Měření Peltierové termobaterie TEG1-12610-5.1 |

Příloha č.1 Měření dvou Peltierových termobaterií TEG2-12610-5.1

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA



Měření k bakalářské práci:

Využití Peltierových termočlánků jako alternativního zdroje energie

Vypracoval: Petr Hawliczek
LOGIN: HAW007

Datum měření:
2.3.2011 & 9.3.2011

Měření dvou Peltierových termobaterií TEG2-12610-5.1

1) Cíl měření:

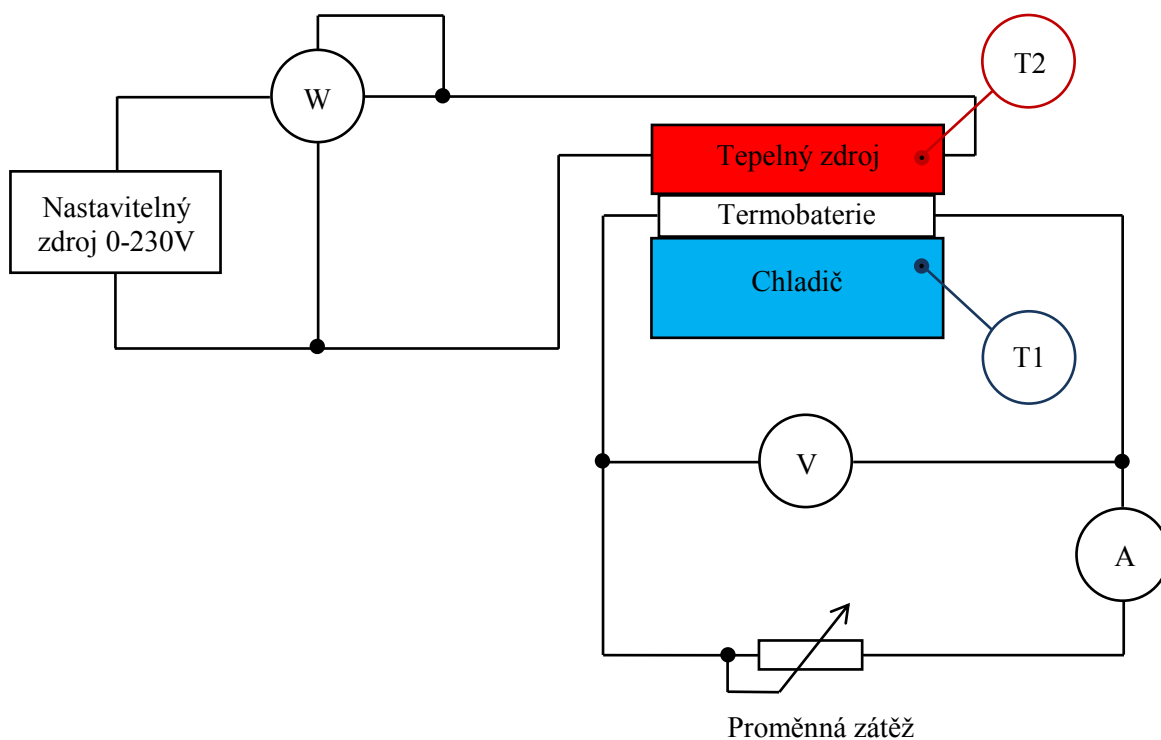
Cílem tohoto měření je změřit vlastnosti termobaterií TEG2-12610-5.1 v co největším rozsahu teplot a určit jejich výkon, účinnost a ideální zatěžovací odpor v závislosti na rozdílu teplot horké a chladné strany. Naměřená data pak použít do bakalářské práce, ve které budu zvažovat ekonomičnost využití termobaterií pro výrobu elektrické energie z odpadního tepla.

2) Postup měření:

- 1) Zapojit celé schéma pro měření.
- 2) Regulovat teplotu tak, aby se rozdíl teplot na termobateriích ustálil.
- 3) Odečíst výkon vstupující do topného elementu.
- 4) Zapsat rozdíl teplot na stranách termobaterií a vytvořit snímek termokamerou.
- 5) Provést měření VA-charakteristiky termobaterií.
- 6) Z měření nakrátko určit vnitřní odpor termobaterií.
- 7) Určit výkony termobaterií z VA-charakteristiky při měření se zátěžemi blízkými vnitřnímu odporu termobaterií a určit ideální zátěž (zátěž, u které generují termobaterie nejvyšší výkon).
- 8) Postup bodů 2 až 6 zpracovat pro rozdíl teplot od 2°C do nejvyššího možného naměřeného rozdílu.

3) Schéma zapojení pro měření:

Schéma pro měření dvou termoelektrických baterií TEG2-12610-5.1 zapojených do série se skládá z tepelného zdroje, samotných termobaterií a chlazení. Tepelný zdroj je v tomto případě topný element ze žehličky využívající Joulových ztrát při průchodu elektrické energie. Tento zdroj tepla je napájen nastavitelným zdrojem střídavého proudu 0-230V (autotransfornátorem) a výkon vstupující do topného elementu je měřen wattmetrem (W). Chladič je aktivní. Teplota horké i chladné strany je měřena teplotním dataloggerem s termočlánkovými čidly (T1 a T2). Termobaterie se chovají jako zdroj elektrické energie s určitým vnitřním odporem a proto je třeba nalézt ideální zátěž pro co největší potenciál využití elektrické energie. Jako proměnná zátěž je použit reostat s relativně nízkým odporem (16Ω). Výkon termobaterií je měřen pomocí voltmetru (V) a ampérmetru (A). Voltmetr je připojen přímo na výstup termobaterií a to kvůli správnosti měření, kdy vznikne znatelný úbytek napětí na ampérmetru. V tomto zapojení se ampérmetr chová jako malý odpor v sérii s reostatem, což nevnáší do měření chybu metody.



4) Vlastnosti Peltierovy termobaterie TEG1(2)-12610-5.1 dle výrobce

Rozměry: 40mm x 40mm x 3mm

Napětí naprázdno: 8.6V

Vnitřní odpor: 3Ω

Napětí při ideálním zatížení: 4.2V

Proud při ideálním zatížení: 1.4A

Výkon při ideálním zatížení: 5.9W

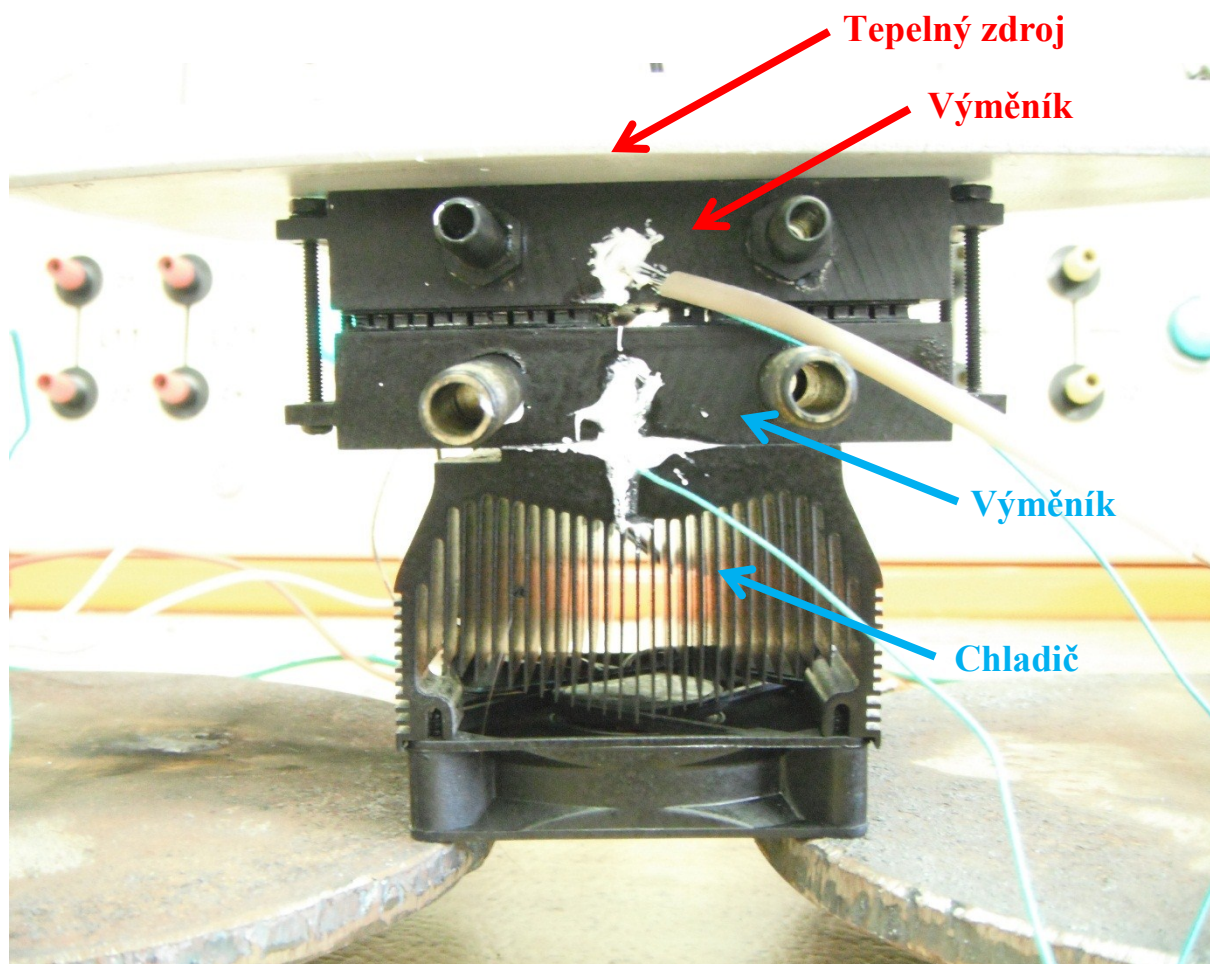
Maximální tepelný tok přes termobaterii: přibližně 140W

Tepelný tok: přibližně 8.8W/cm²

5) Vzhled reálného zapojení:

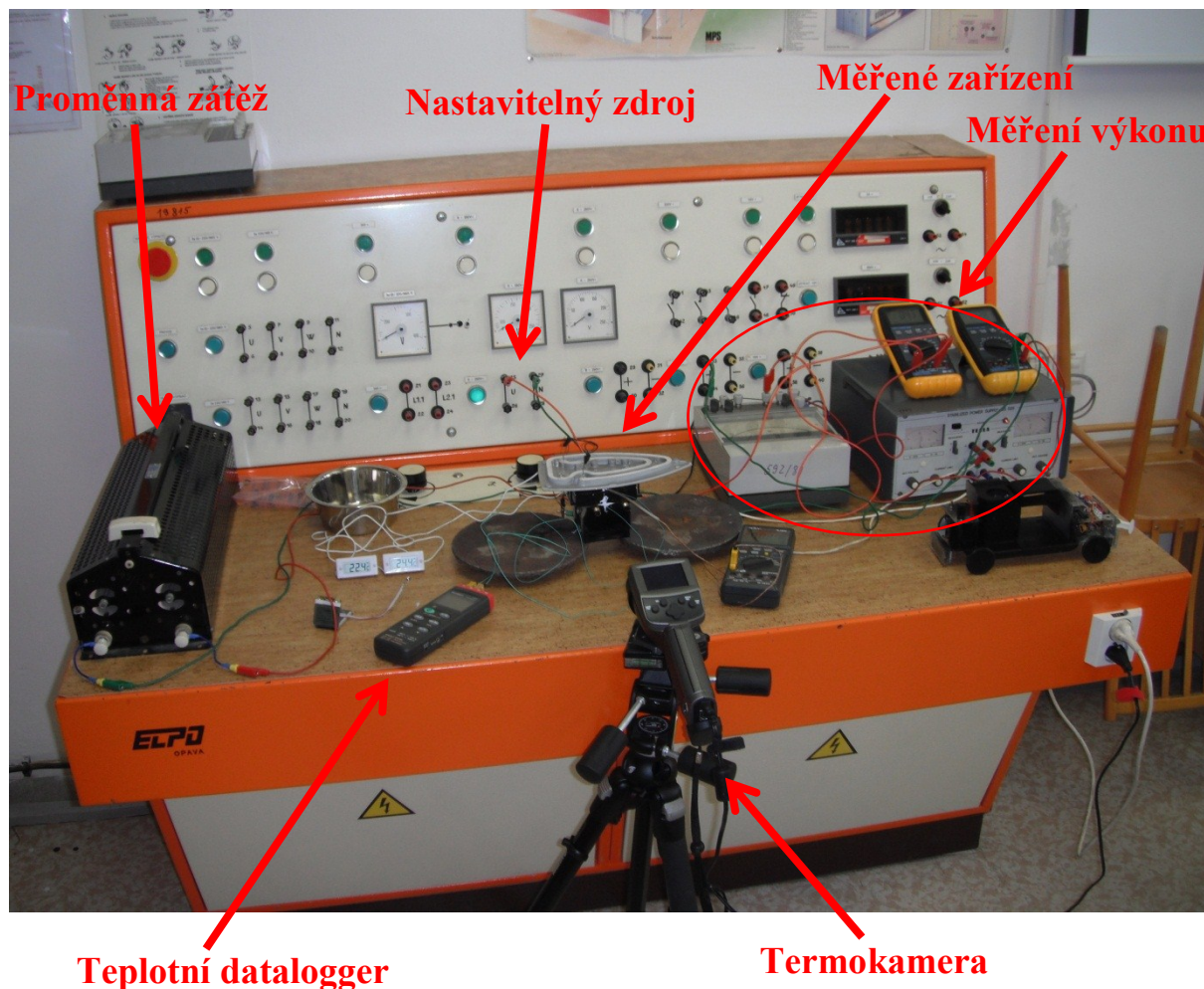
Reálné zapojení se skládá z topného tělesa zahřívající horní tepelný výměník a chladič používaný na chlazení procesoru v PC chladicí spodní výměník. Vyčnávající trubky v tomto měření nemají účel, byly používány pouze pro předchozí měření, kdy se ke chlazení a ohřívání používala voda. Ve středech výměníků jsou přilepeny teplovodivou pastou termočlánky dataloggeru pro měření teplot. Termobaterie jsou umístěny mezi výměníky. Skládají se z malých krychliček polovodivého materiálu vykazujícího termoelektrický jev. Všechny tyto krychličky jsou spojeny do série a vytváří termobaterii. Mezi všemi spoji pro vedení tepla je namazaná teplovodivá pasta, pro co nejlepší tepelnou výměnu. Kvalitu tepelné výměny je vidět na termosnímcích v tomto protokolu níže. Výstupní vodiče termobaterií jsou na druhé straně. Výměníky a chladič je z hliníku, je však nastříkán emisivní barvou s danou emisivitou, kvůli přesnosti snímku pořízených termokamerou.

Detail měřených termobaterií:



Na dalším snímku je vidět celkové rozložení přístrojů. Jako nastavitelný zdroj energie pro tepelný element slouží stůl, ve kterém je integrovaný autotransformátor 0-230V. Vstupní výkon je měřen analogovým wattmetrem (W) a ještě kontrolován digitálním voltmetrem a digitálním ampérmetrem. Elektrická energie proudí do měřeného zařízení, kde vytváří v topném elementu Joulovými ztrátami teplo. Energie z termobaterií je přes voltmetr (V) a ampérmetr (A) přiváděna do proměnné zátěže. Měření teplot zajišťuje teplotní datalogger a termokamera.

Celkové reálné zapojení:



6) Tabulky naměřených a vypočtených hodnot a termosnímky rozložení teploty:

Měření bylo prováděno při okolní teplotě 20°C a vlhkosti 46%.

Tabulek je celkem 11 pro rozdíly teplot 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 a 100°C. Každá tabulka obsahuje naměřené teploty, vypočtený rozdíl teplot, naměřené napětí a proudy pro různé zátěže a červeně vyznačený řádek pro ideální zátěž, kdy je výstupní výkon nejvyšší. Výkon termobaterií je také vypočten. Dále tabulka obsahuje naměřený vstupní výkon do topného elementu, vypočtený odpor zátěže z napětí a proudu a výkon ztrát prouděním a sáláním (výkon potřebný pro udržení stejné teploty bez zátěže termobateriemi). Jako poslední hodnota je výkon procházející termobateriemi s odpočtem ztrát prouděním a sáláním.

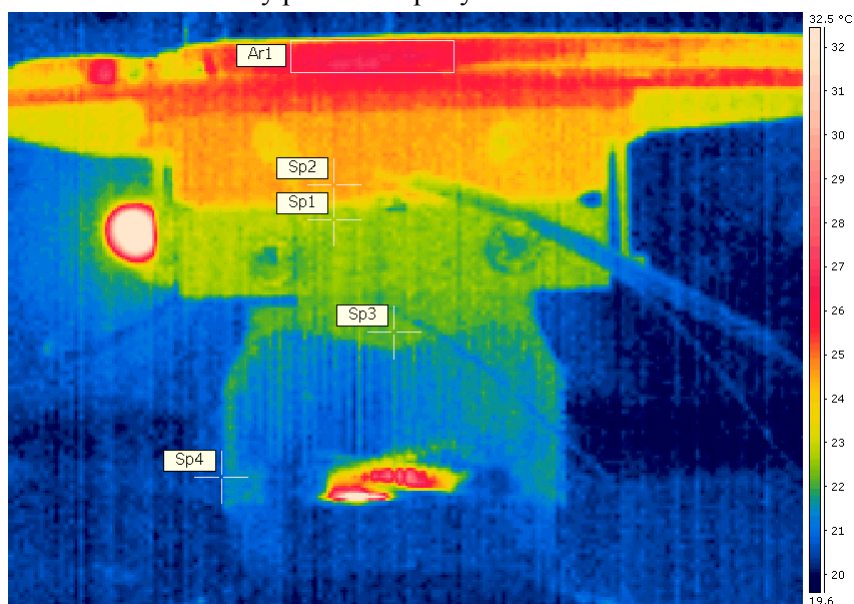
Dále jsou v tabulce ještě 2 vypočtené hodnoty dole a to ideální odpor zátěže ($R_{\text{ideální zátěže}}$) a účinnost přeměny tepelné energie na elektrickou (η).

Za každou tabulkou je snímek pořízen termokamerou pro zjištění informace o přesném rozložení teplot. Výměník s termobateriemi a chladič je nastříkám emisní barvou, takže teploty se budou velice blížit pravdivým hodnotám, avšak povrch topného elementu je lesklý, proto se na něm mohou teploty znatelně lišit.

První rozdíl teplot = 2°C:

Zátěž č.	T ₁	T ₂	ΔT	U	I	P _{výstupní}	P _{vstupní celkové}	R _{zátěže}	P _{ztráty}	P _{vstupníTEG}
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[V]	[A]	[W]	[W]	[Ω]	[W]	[W]
1	21,5	23,5	2	0,075	0	0,00000	8	naprázdno	2	6
2	21,5	23,5	2	0,067	0,005	0,00034	8	13,40	2	6
3	21,5	23,5	2	0,063	0,01	0,00063	8	6,30	2	6
4	21,5	23,5	2	0,055	0,02	0,00110	8	2,75	2	6
5	21,5	23,5	2	0,035	0,05	0,00175	8	0,70	2	6
6	21,5	23,5	2	0	0,1	0,00000	8	0,00	2	6
R _{ideální zátěže} [Ω]								0,75	η [%]	0,029

Snímek z termokamery pro dané teploty:



Hodnoty teplot označených bodů:

Ar1 Min 25,2 °C Max 27,1 °C Average 26,0 °C

Sp1 22,7 °C

Sp2 24,5 °C

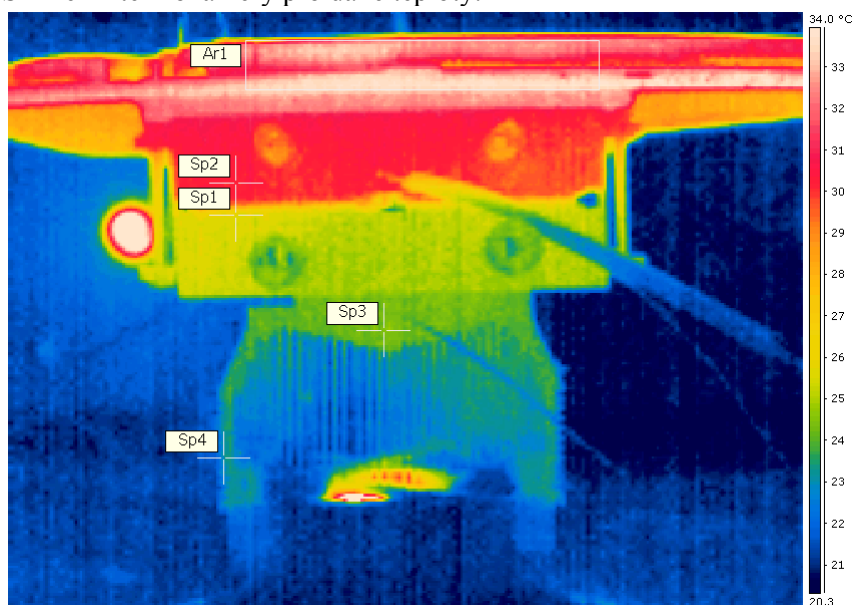
Sp3 22,1 °C

Sp4 21,3 °C

Druhý rozdíl teplot = 5°C:

Zátěž č.	T ₁	T ₂	ΔT	U	I	P _{výstupní}	P _{vstupní celkové}	R _{zátěže}	P _{ztráty}	P _{vstupníTEG}
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[V]	[A]	[W]	[W]	[Ω]	[W]	[W]
1	23,8	28,8	5	0,26	0	0,0000	22	naprázdno	5	17
2	23,8	28,8	5	0,24	0,05	0,0120	22	4,80	5	17
3	23,8	28,8	5	0,18	0,1	0,0180	22	1,80	5	17
4	23,8	28,8	5	0,155	0,15	0,0233	22	1,03	5	17
5	23,8	28,8	5	0,125	0,2	0,0250	22	0,63	5	17
6	23,8	28,8	5	0,09	0,25	0,0225	22	0,36	5	17
7	23,8	28,8	5	0,04	0,3	0,0120	22	0,13	5	17
8	23,8	28,8	5	0	0,36	0,0000	22	0,00	5	17
R _{ideální zátěže}								0,72	η [%]	0,147

Snímek z termokamery pro dané teploty:



Hodnoty teplot označených bodů:

Ar1 Min 28,5 °C Max 34,0 °C Average 32,4 °C

Sp1 25,5 °C

Sp2 30,0 °C

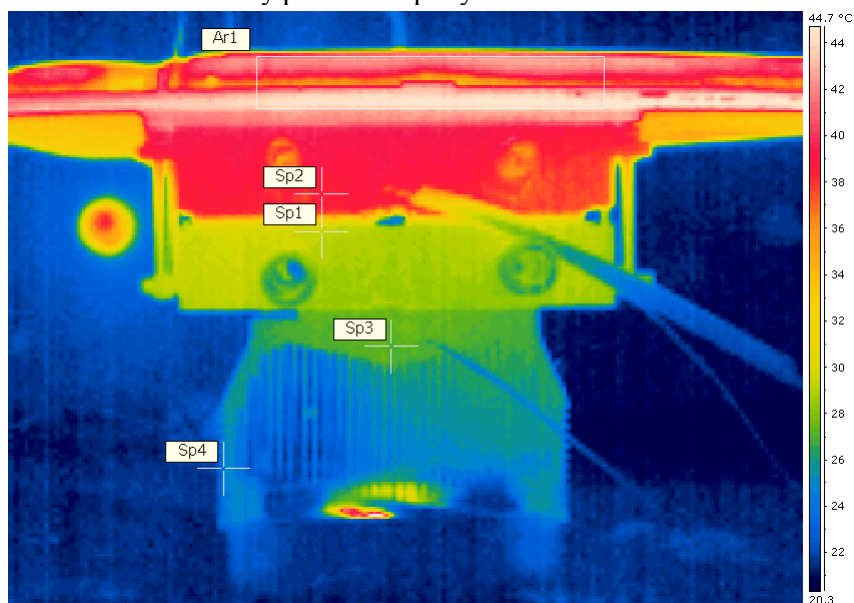
Sp3 24,4 °C

Sp4 23,3 °C

Třetí rozdíl teplot = 10°C:

Zátěž č.	T ₁	T ₂	ΔT	U	I	P _{výstupní}	P _{vstupní celkové}	R _{zátěže}	P _{ztráty}	P _{vstupníTEG}
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[V]	[A]	[W]	[W]	[Ω]	[W]	[W]
1	26,6	36,6	10	0,55	0	0,000	40	naprázdno	10	30
2	26,6	36,6	10	0,48	0,05	0,024	40	9,60	10	30
3	26,6	36,6	10	0,41	0,1	0,041	40	4,10	10	30
4	26,6	36,6	10	0,365	0,15	0,055	40	2,43	10	30
5	26,6	36,6	10	0,31	0,2	0,062	40	1,55	10	30
6	26,6	36,6	10	0,25	0,25	0,063	40	1,00	10	30
7	26,6	36,6	10	0,2	0,3	0,060	40	0,67	10	30
8	26,6	36,6	10	0,1	0,4	0,040	40	0,25	10	30
9	26,6	36,6	10	0	0,5	0,000	40	0,00	10	30
R _{ideální zátěže}								1,10	η [%]	0,21

Snímek z termokamery pro dané teploty:



Hodnoty teplot označených bodů:

Ar1 Min 34,2 °C Max 45,3 °C Average 41,4 °C

Sp1 29,1 °C

Sp2 38,2 °C

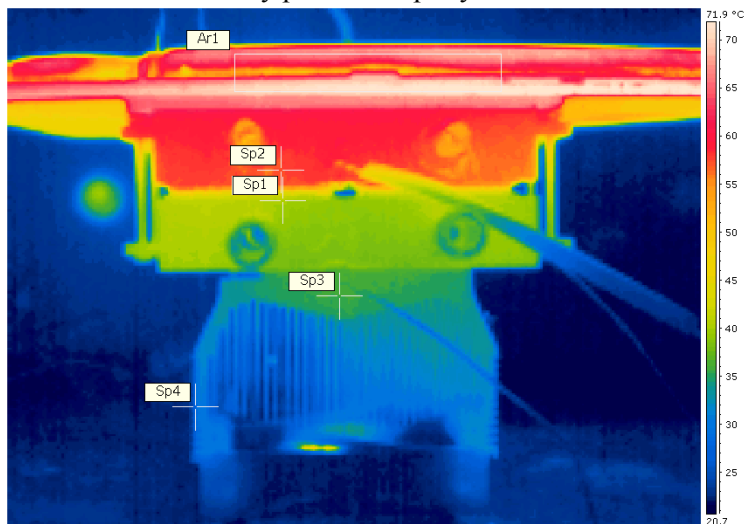
Sp3 27,0 °C

Sp4 24,8 °C

Čtvrtý rozdíl teplot = 20°C:

Zátěž č.	T ₁	T ₂	ΔT	U	I	P _{výstupní}	P _{vstupní celkové}	R _{zátěže}	P _{ztráty}	P _{vstupníTEG}
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[V]	[A]	[W]	[W]	[Ω]	[W]	[W]
1	35,3	55,3	20	1,1	0	0,00	96	naprázdno	20	76
2	35,3	55,3	20	1,1	0,1	0,11	96	11,00	20	76
3	35,3	55,3	20	1,05	0,15	0,16	96	7,00	20	76
4	35,3	55,3	20	1	0,2	0,20	96	5,00	20	76
6	35,3	55,3	20	0,9	0,3	0,27	96	3,00	20	76
7	35,3	55,3	20	0,85	0,35	0,30	96	2,43	20	76
9	35,3	55,3	20	0,65	0,5	0,33	96	1,30	20	76
10	35,3	55,3	20	0,6	0,55	0,33	96	1,09	20	76
11	35,3	55,3	20	0,51	0,6	0,31	96	0,85	20	76
12	35,3	55,3	20	0,38	0,7	0,27	96	0,54	20	76
13	35,3	55,3	20	0,29	0,8	0,23	96	0,36	20	76
14	35,3	55,3	20	0,21	0,9	0,19	96	0,23	20	76
15	35,3	55,3	20	0,17	1	0,17	96	0,17	20	76
16	35,3	55,3	20	0	1,1	0,00	96	0,00	20	76
R _{ideální zátěže}								1,00	η [%]	0,43

Snímek z termokamery pro dané teploty:



Hodnoty teplot označených bodů:

Ar1 Min 48,8 °C Max 73,1 °C Average 64,6 °C

Sp1 39,8 °C

Sp2 57,3 °C

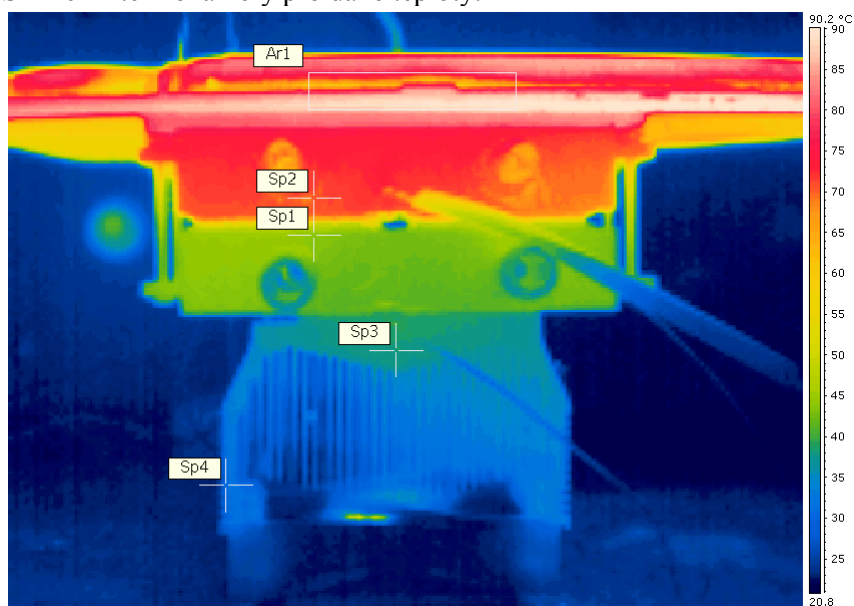
Sp3 35,4 °C

Sp4 29,5 °C

Pátý rozdíl teplot = 30°C:

Zátěž č.	T ₁	T ₂	ΔT	U	I	P _{výstupní}	P _{vstupní celkové}	R _{zátěže}	P _{ztráty}	P _{vstupníTEG}
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[V]	[A]	[W]	[W]	[Ω]	[W]	[W]
1	38	68	30	1,63	0	0,00	120	naprázdno	30	90
2	38	68	30	1,55	0,1	0,16	120	15,50	30	90
3	38	68	30	1,38	0,2	0,28	120	6,90	30	90
4	38	68	30	1,25	0,3	0,38	120	4,17	30	90
5	38	68	30	1,15	0,4	0,46	120	2,88	30	90
6	38	68	30	1	0,5	0,50	120	2,00	30	90
7	38	68	30	0,89	0,6	0,53	120	1,48	30	90
8	38	68	30	0,73	0,71	0,52	120	1,03	30	90
9	38	68	30	0,6	0,8	0,48	120	0,75	30	90
10	38	68	30	0,44	1	0,44	120	0,44	30	90
11	38	68	30	0	1,35	0,00	120	0,00	30	90
R _{ideální zátěže}								1,21	η [%]	0,59

Snímek z termokamery pro dané teploty:



Hodnoty teplot označených bodů:

Ar1 Min 59,3 °C Max 91,0 °C Average 80,4 °C

Sp1 43,4 °C

Sp2 70,7 °C

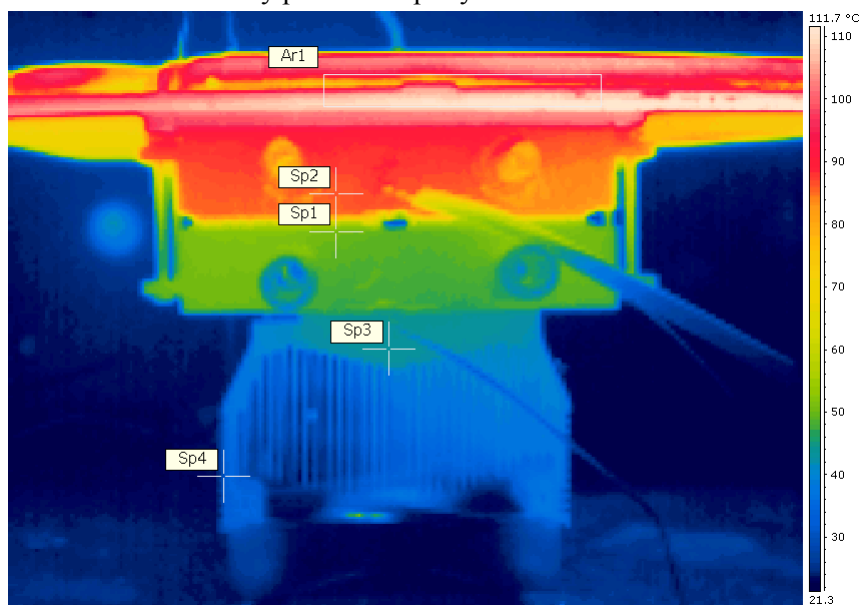
Sp3 37,8 °C

Sp4 31,6 °C

Šestý rozdíl teplot = 40°C:

Zátěž č.	T ₁	T ₂	ΔT	U	I	P _{výstupní}	P _{vstupní celkové}	R _{zátěže}	P _{ztráty}	P _{vstupníTEG}
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[V]	[A]	[W]	[W]	[Ω]	[W]	[W]
1	42,2	82,2	40	2,22	0	0,00	175	naprázdno	40	135
2	42,2	82,2	40	2	0,2	0,40	175	10,00	40	135
3	42,2	82,2	40	1,85	0,3	0,56	175	6,17	40	135
4	42,2	82,2	40	1,72	0,4	0,69	175	4,30	40	135
5	42,2	82,2	40	1,6	0,5	0,80	175	3,20	40	135
6	42,2	82,2	40	1,47	0,6	0,88	175	2,45	40	135
7	42,2	82,2	40	1,34	0,7	0,94	175	1,91	40	135
8	42,2	82,2	40	1,25	0,8	1,00	175	1,56	40	135
9	42,2	82,2	40	1,15	0,9	1,04	175	1,28	40	135
10	42,2	82,2	40	1	1	1,00	175	1,00	40	135
11	42,2	82,2	40	0,75	1,25	0,94	175	0,60	40	135
12	42,2	82,2	40	0,45	1,5	0,68	175	0,30	40	135
13	42,2	82,2	40	0	1,8	0,00	175	0,00	40	135
R _{ideální zátěže}								1,23	η [%]	0,77

Snímek z termokamery pro dané teploty:



Hodnoty teplot označených bodů:

Ar1 Min 72,3 °C Max 113,6 °C Average 100,7 °C

Sp1 49,8 °C

Sp2 85,3 °C

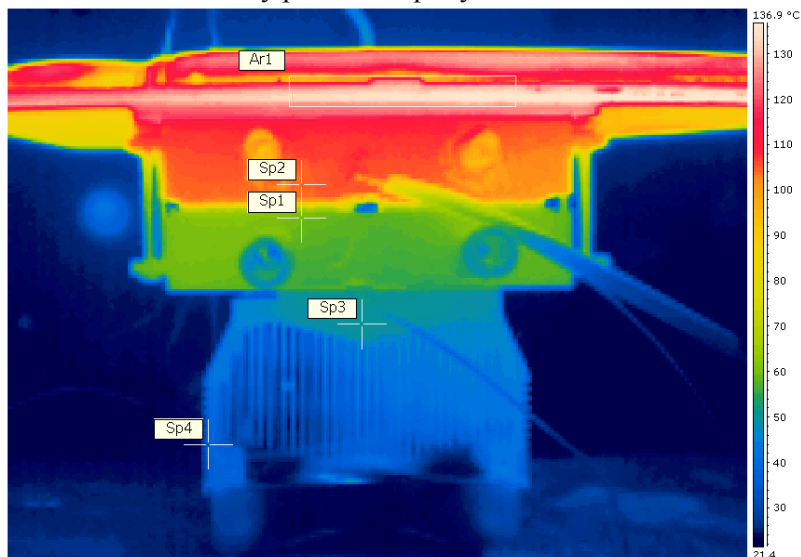
Sp3 42,6 °C

Sp4 33,6 °C

Sedmý rozdíl teplot = 50°C:

Zátěž č.	T ₁	T ₂	ΔT	U	I	P _{výstupní}	P _{vstupní celkové}	R _{zátěže}	P _{ztráty}	P _{vstupníTEG}
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[V]	[A]	[W]	[W]	[Ω]	[W]	[W]
1	51,7	101,7	50	2,8	0	0,00	220	naprázdno	45	175
3	51,7	101,7	50	2,55	0,3	0,77	220	8,50	45	175
4	51,7	101,7	50	2,43	0,4	0,97	220	6,08	45	175
6	51,7	101,7	50	2,17	0,6	1,30	220	3,62	45	175
7	51,7	101,7	50	2,05	0,7	1,44	220	2,93	45	175
8	51,7	101,7	50	1,9	0,8	1,52	220	2,38	45	175
10	51,7	101,7	50	1,6	1	1,60	220	1,60	45	175
11	51,7	101,7	50	1,5	1,1	1,65	220	1,36	45	175
12	51,7	101,7	50	1,33	1,2	1,60	220	1,11	45	175
13	51,7	101,7	50	1,13	1,35	1,53	220	0,84	45	175
14	51,7	101,7	50	0,9	1,5	1,35	220	0,60	45	175
16	51,7	101,7	50	0,52	1,75	0,91	220	0,30	45	175
17	51,7	101,7	50	0	2,1	0,00	220	0,00	45	175
R _{ideální zátěže}								1,33	η [%]	0,94

Snímek z termokamery pro dané teploty:



Hodnoty teplot označených bodů:

Ar1 Min 93,7 °C Max 137,4 °C Average 127,2 °C

Sp1 58,8 °C

Sp2 104,0 °C

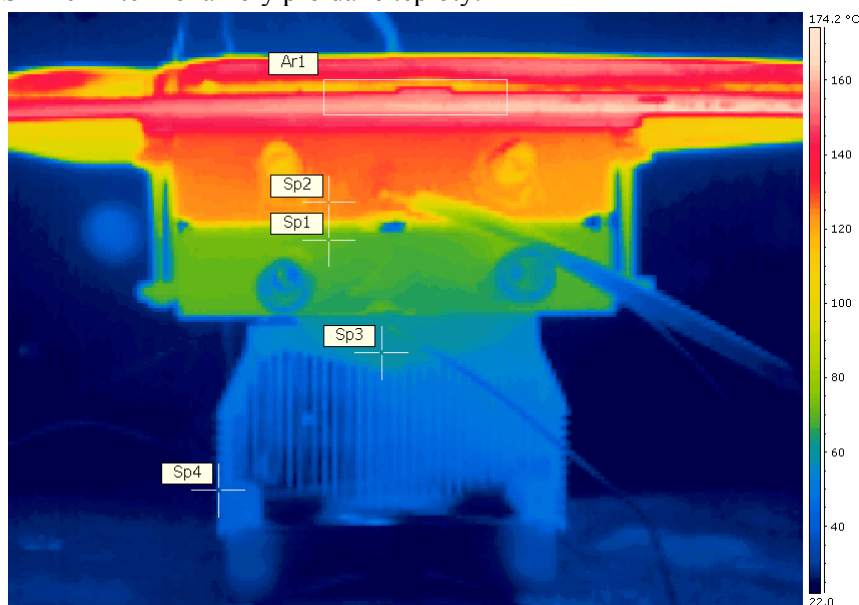
Sp3 49,3 °C

Sp4 38,1 °C

Osmý rozdíl teplot = 60°C:

Zátěž č.	T ₁	T ₂	ΔT	U	I	P _{výstupní}	P _{vstupní celkové}	R _{zátěže}	P _{ztráty}	P _{vstupníTEG}
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[V]	[A]	[W]	[W]	[Ω]	[W]	[W]
1		121,2	60	3,5	0	0,00	250	naprázdno	55	195
2	61,2	121,2	60	3,3	0,2	0,66	250	16,50	55	195
3	61,2	121,2	60	3,1	0,4	1,24	250	7,75	55	195
4	61,2	121,2	60	2,85	0,6	1,71	250	4,75	55	195
5	61,2	121,2	60	2,6	0,8	2,08	250	3,25	55	195
6	61,2	121,2	60	2,3	1	2,30	250	2,30	55	195
7	61,2	121,2	60	2	1,2	2,40	250	1,67	55	195
8	61,2	121,2	60	1,75	1,4	2,45	250	1,25	55	195
9	61,2	121,2	60	1,5	1,6	2,40	250	0,94	55	195
10	61,2	121,2	60	0,85	2	1,70	250	0,43	55	195
11	61,2	121,2	60	0	2,5	0,00	250	0,00	55	195
R _{ideální zátěže}								1,40	η [%]	1,26

Snímek z termokamery pro dané teploty:



Hodnoty teplot označených bodů:

Ar1 Min 109,4 °C Max 162,5 °C Average 147,0 °C

Sp1 69,0 °C

Sp2 123,4 °C

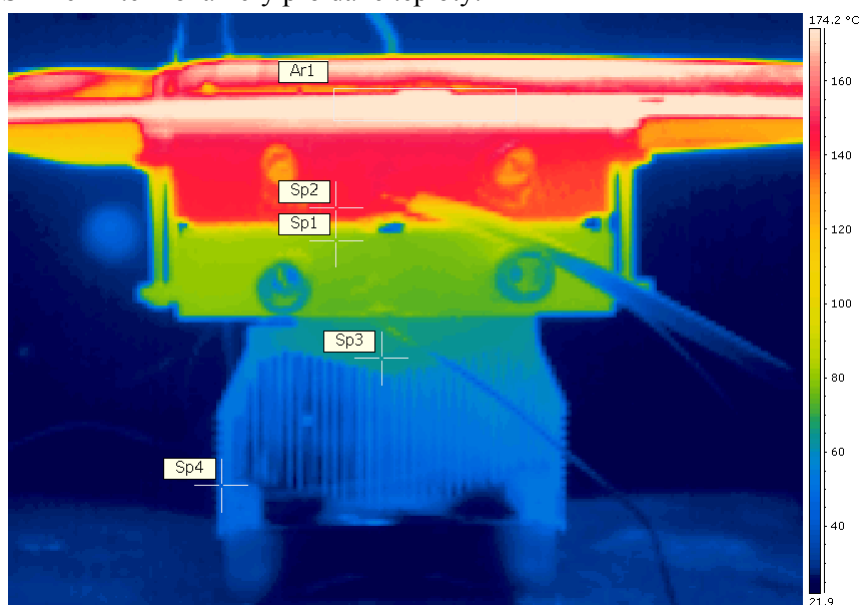
Sp3 57,7 °C

Sp4 40,6 °C

Devátý rozdíl teplot = 70°C:

Zátěž č.	T ₁	T ₂	ΔT	U	I	P _{výstupní}	P _{vstupní celkové}	R _{zátěže}	P _{ztráty}	P _{vstupníTEG}
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[V]	[A]	[W]	[W]	[Ω]	[W]	[W]
1	70	140	70	4,15	0	0,00	310	naprázdno	80	230
2	70	140	70	3,8	0,25	0,95	310	15,20	80	230
3	70	140	70	3,45	0,5	1,73	310	6,90	80	230
4	70	140	70	3	0,75	2,25	310	4,00	80	230
5	70	140	70	2,65	1	2,65	310	2,65	80	230
6	70	140	70	2,3	1,2	2,76	310	1,92	80	230
7	70	140	70	1,95	1,4	2,73	310	1,39	80	230
8	70	140	70	1,6	1,6	2,56	310	1,00	80	230
9	70	140	70	1,3	1,8	2,34	310	0,72	80	230
10	70	140	70	1	2	2,00	310	0,50	80	230
11	70	140	70	0	2,7	0,00	310	0,00	80	230
R _{ideální zátěže}								1,54	η [%]	1,20

Snímek z termokamery pro dané teploty:



Hodnoty teplot označených bodů:

Ar1 Min 148,1 °C Max 189,9 °C Average 177,1 °C

Sp1 78,0 °C

Sp2 142,5 °C

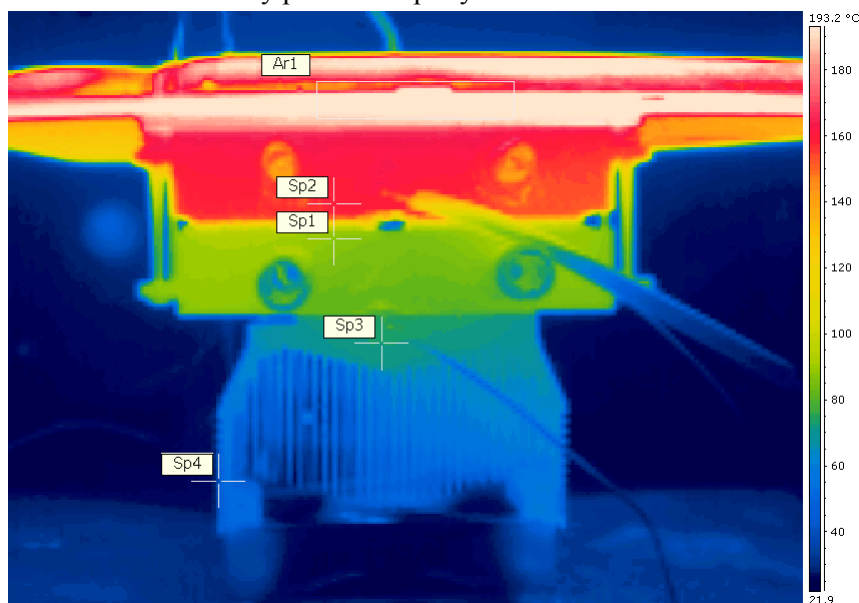
Sp3 64,3 °C

Sp4 47,4 °C

Desátý rozdíl teplot = 80°C:

Zátěž č.	T ₁	T ₂	ΔT	U	I	P _{výstupní}	P _{vstupní celkové}	R _{zátěže}	P _{ztráty}	P _{vstupníTEG}
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[V]	[A]	[W]	[W]	[Ω]	[W]	[W]
1	72	152	80	4,55	0	0,00	360	naprázdno	90	270
2	72	152	80	4,25	0,25	1,06	360	17,00	90	270
3	72	152	80	3,95	0,5	1,98	360	7,90	90	270
4	72	152	80	3,5	0,75	2,63	360	4,67	90	270
5	72	152	80	3,05	1	3,05	360	3,05	90	270
6	72	152	80	2,65	1,25	3,31	360	2,12	90	270
7	72	152	80	2,3	1,5	3,45	360	1,53	90	270
8	72	152	80	1,9	1,75	3,33	360	1,09	90	270
9	72	152	80	1,45	2	2,90	360	0,73	90	270
10	72	152	80	0	3	0,00	360	0,00	90	270
R _{ideální zátěže}								1,52	η [%]	1,28

Snímek z termokamery pro dané teploty:



Hodnoty teplot označených bodů:

Ar1 Min 144,8 °C Max 210,7 °C Average 192,2 °C

Sp1 86,8 °C

Sp2 157,8 °C

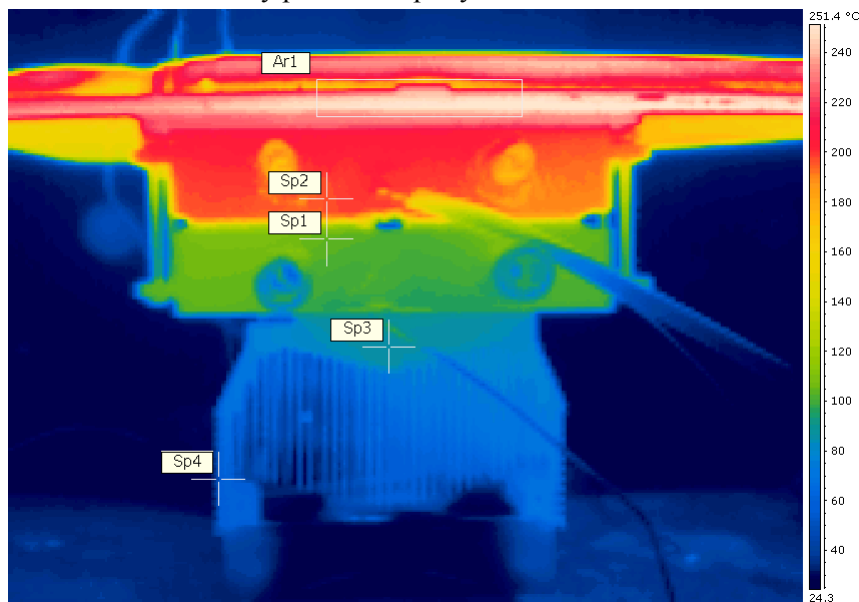
Sp3 71,9 °C

Sp4 49,0 °C

Jedenáctý rozdíl teplot = 100°C:

Zátěž č.	T ₁	T ₂	ΔT	U	I	P _{výstupní}	P _{vstupní celkové}	R _{zátěže}	P _{ztráty}	P _{vstupníTEG}
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[V]	[A]	[W]	[W]	[Ω]	[W]	[W]
1	93	193	100	5,3	0	0,00	500	naprázdno	160	340
2	93	193	100	4,85	0,3	1,46	500	16,17	160	340
3	93	193	100	4,4	0,6	2,64	550	7,33	160	390
4	93	193	100	4,1	0,9	3,69	550	4,56	160	390
5	93	193	100	3,6	1,2	4,32	550	3,00	160	390
6	93	193	100	3,1	1,5	4,65	550	2,07	160	390
7	93	193	100	2,4	1,8	4,32	640	1,33	160	480
8	93	193	100	2	2,1	4,20	640	0,95	160	480
9	93	193	100	1,55	2,4	3,72	640	0,65	160	480
10	93	193	100	1,15	2,7	3,11	640	0,43	160	480
11	93	193	100	0,8	3	2,40	700	0,27	160	540
12	93	193	100	0	3,4	0,00	700	0,00	160	540
R _{ideální zátěže}								1,56	η [%]	1,19

Snímek z termokamery pro dané teploty:



Hodnoty teplot označených bodů:

Ar1 Min 163,5 °C Max *254,1 °C Average *231,4 °C

Sp1 103,0 °C

Sp2 196,2 °C

Sp3 84,6 °C

Sp4 58,9 °C

Tabulka závislosti maximálního výkonu P_{\max} na rozdílu teplot:

Hodnoty maximálního výkonu jsou vybrány z předešlých tabulek a zde jsou v závislosti na teplotě. V tabulce je dále vstupní tepelný výkon, jednotlivé teploty, napětí a proud při daném výstupním maximálním výkonu, ideální vstupní odpor a účinnost.

ΔT	$P_{\text{MaxVýstupní}}$	$P_{\text{vstupní}}$	T_1	T_2	U	I	$R_{\text{ideální}}$	účinnost
[°C]	[W]	[W]	[°C]	[°C]	[V]	[A]	[Ω]	[%]
2	0,00175	6	21,5	23,5	0,035	0,05	0,7	0,029
5	0,025	17	23,8	28,8	0,125	0,2	0,63	0,147
10	0,063	30	26,6	36,6	0,25	0,25	1	0,21
20	0,33	76	35,3	55,3	0,6	0,55	1,09	0,43
30	0,53	90	38	68	0,89	0,6	1,48	0,59
40	1,04	135	42,2	82,2	1,15	0,9	1,28	0,77
50	1,65	175	51,7	101,7	1,5	1,1	1,36	0,94
60	2,45	195	61,2	121,2	1,75	1,4	1,25	1,26
70	2,76	230	70	140	2,3	1,2	1,92	1,2
80	3,45	270	72	152	2,3	1,5	1,53	1,28
100	4,65	390	93	193	3,1	1,5	2,07	1,19

Tabulka závislosti účinnosti a maximálního výkonu dodávaného termobateriemi na rozdílu teplot:

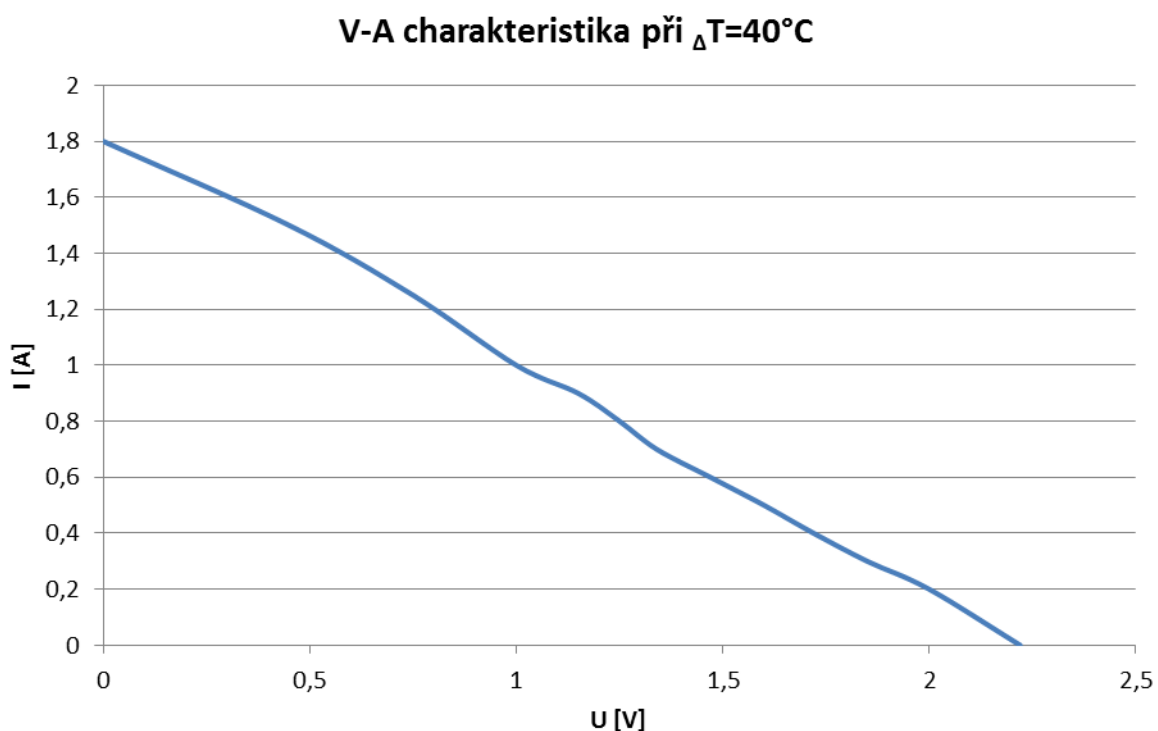
V této tabulce jsou vybrány pouze již hodnoty závislosti výkonu termobaterií na rozdílu teplot a jejich maximální výkon při daném teplotním rozdílu.

ΔT	účinnost	$P_{\text{MaxVýstupní}}$
[°C]	[%]	[W]
2	0,029	0,00175
5	0,147	0,025
10	0,21	0,063
20	0,43	0,33
30	0,59	0,53
40	0,77	1,04
50	0,94	1,65
60	1,26	2,45
70	1,2	2,76
80	1,28	3,45
100	1,19	4,65

7) Grafy charakteristik termobaterií:

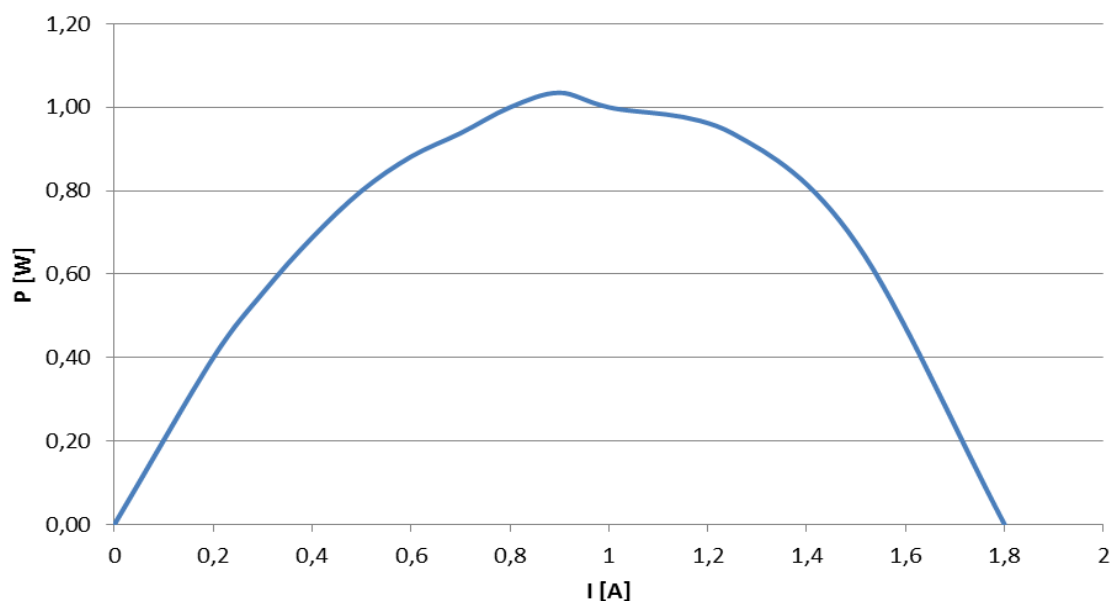
Charakteristické grafy vlastností termobaterií při jedné teplotě:

První série grafů je zaměřena na tabulku naměřených hodnot pro rozdíl teplot $\Delta T = 40^\circ\text{C}$. Tento rozdíl teplot je vybrán, protože v praxi by byly tyto články při využívání odpadního tepla provozovány přibližně v tomto rozdílu teplot. Grafy pro jiné rozdíly teplot budou mít podobný tvar, pouze hodnoty se budou měnit, proto jsem vytvořil pouze grafy pro jeden rozdíl teplot.



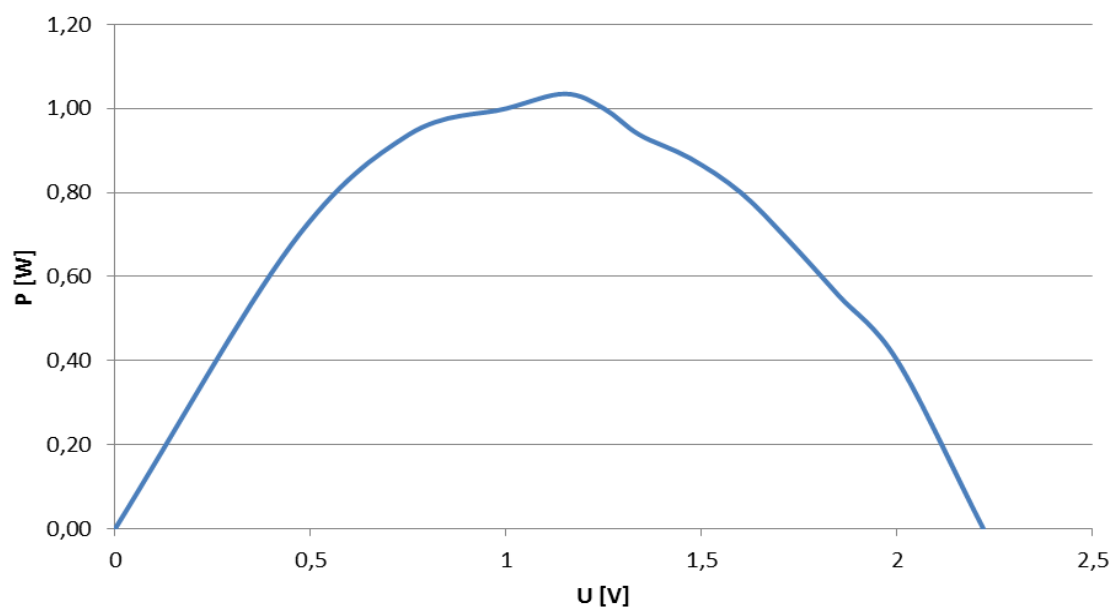
Z VA charakteristiky můžeme vyčíst, že vnitřní odpor termobaterií je nezávislý na zátěži.

Závislost výkonu na odebíraném proudu pro $\Delta T = 40^\circ\text{C}$

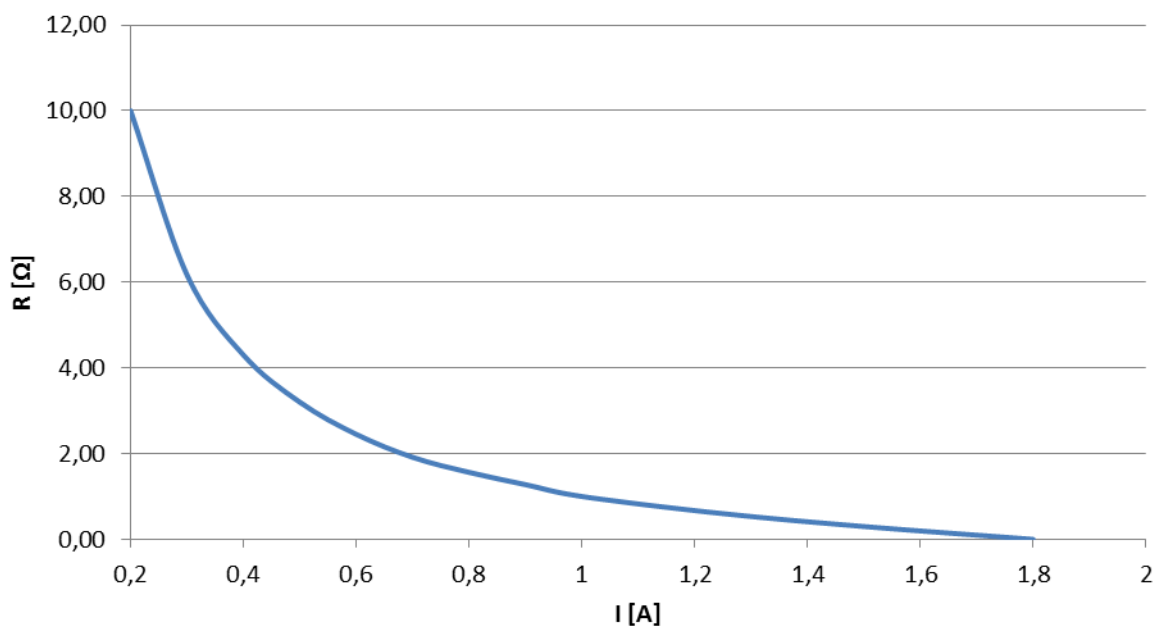


Z grafu závislosti výkonu na odebíraném proudu lze nejlépe vyčíst, proč je určován ideální zátěžný odpor. Ideální bod, kdy termobaterie přeměňují největší množství tepla na elektrickou energii je v maximum na tomto grafu. Je vidět, že maximum je přibližně v polovině proudu nakrátko a tedy i z lineární VA charakteristiky můžeme odvodit, že je to v polovině výstupního napětí naprázdno, což je i vidět na grafu níže. Takto lze vypočíst jednoduše hodnotu ideální zátěže pro praktické využívání.

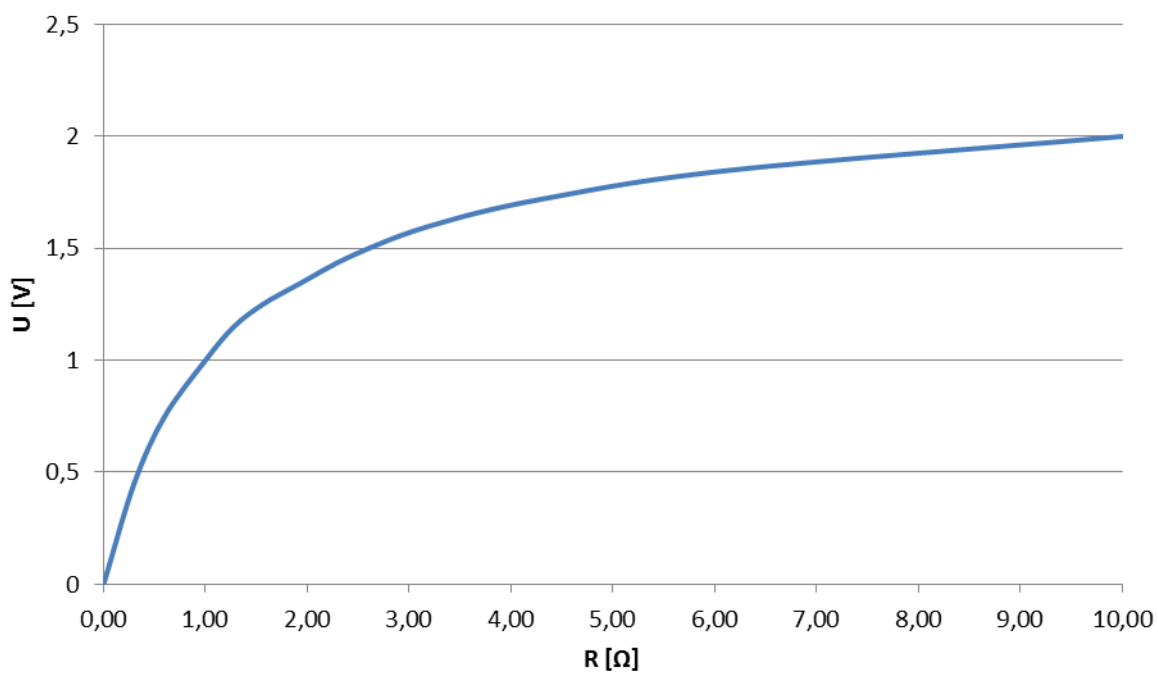
Závislost výkonu na napětí při zátěži při $\Delta T = 40^\circ\text{C}$

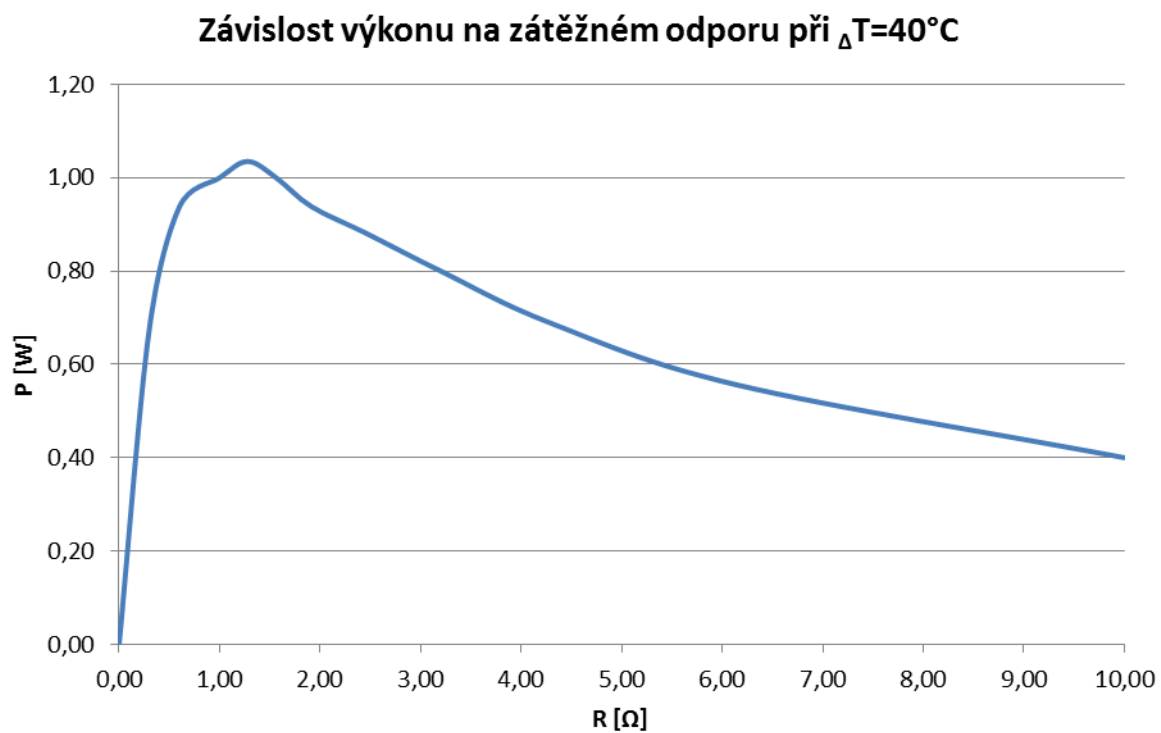


Závislost proudu na zátěžném odporu při $\Delta T = 40^\circ\text{C}$



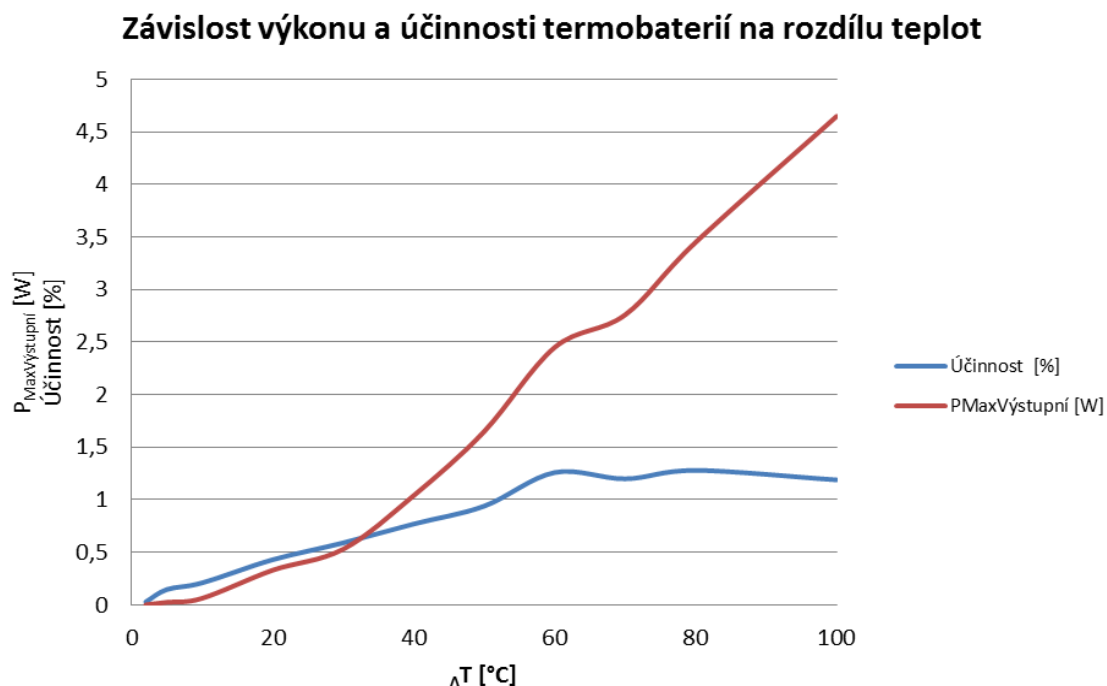
Závislost napětí na zátěžném odporu při $\Delta T = 40^\circ\text{C}$





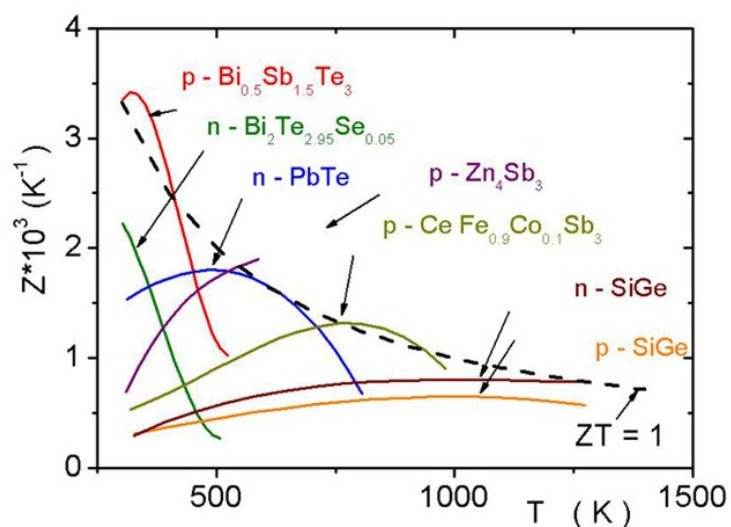
V grafech je vidět nerovnosti křivek a to hlavně v okolí maximálního výkonu, což je způsobeno nepřesností měření.

Výsledný graf závislosti výkonu a účinnosti termobaterií na rozdílu teplot:



Z grafu je vidět, že výkon při malých rozdílech teplot má snahu narůstat exponenciálně, avšak projeví se účinek vnitřního odporu a od rozdílu teplot 30°C roste výkon přibližně lineárně. Účinnost roste zpočátku lineárně, avšak asi u rozdílu teplot 50°C začíná klesat růst křivky a účinnost se pohybuje kolem 1,2%. Klesání růstu účinnosti bude pravděpodobně způsobeno vlastností materiálu termobaterií složených z Bismutu a Telluru. Účinnost termobaterií složených z těchto materiálů ukazuje takzvaný ZT parametr.

Graf ZT parametru různých materiálů:



Z grafu ZT parametru lze vidět, že největší účinnost mají termobaterie z Bismutu a Telluru při teplotě 250 až 300K, což je asi -23 až 27°C, tedy při pokojové teplotě. Ideální by bylo tedy střední teplotu udržovat na této teplotě. Avšak díky ohřívání chladiče střední teplota roste až na 150°C, účinnost se už citelně snižuje, což je vidět na snižování růstu křivky účinnosti v grafu závislosti výkonu a účinnosti na rozdílu teplot.

8) Použité přístroje:

Autotransformátor integrovaný v měřicím stole 0~230V

Wattmetr EL20, TP 0,2 max. rozsah 450V, 5A

Tepelný element ze žehličky 1000W

2x termobaterie TEG2-12610-5.1 s tepelným výměníkem

Aktivní chladič z PC středního výkonu

Datalogger k měření teplot VOLTcraft K204 (-200°C ~ 1370°C) se dvěma termočláňkovými čidly

Reostat POD60 P7 16Ω/10A

2x multimetr MASTECH MY-68 (měření napětí a proudu)

Termokamera FLIR E45

9) Závěr:

Toto měření splnilo svůj účel a ukázalo reálnou účinnost termobaterie TEG2-12610-5.1, která se pohybuje u teplot pro využívání odpadního tepla v hodnotách kolem 1%. Dále z měření vyplývá závislost generovaného výkonu na rozdílu teplot na termobateriích. Další důležité hodnoty jsou vnitřní odpor termobaterií, vstupní výkon při určitých rozdílech teplot a ideální odběrové napětí a proud pro různé teploty.

Měření proběhlo bez problému, odchylky naměřených hodnot jsou v normě a odpovídají předpokládaným vlastnostem termobaterií. Avšak výrobcem udávané účinnosti jsou o něco vyšší, než které jsem naměřil, což je důležitý poznatek pro reálné využívání termobaterií v praxi, kvůli jejich ekonomické návratnosti.

Snímky s termokamery mají malé odchylky teplot na rozdíl od teplot naměřených dataloggerem, to může být způsobeno jak nečistotami na povrchu emisní barvy, tak samotným principem měření termokamerou, který je do jisté míry nepřesný.

Podobné měření tohoto výměníku jsem prováděl v domácích podmínkách a výsledky jsou uloženy na mých webových stránkách <http://hawelson.blog.cz/0902/spalovak-2-2>.

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA



Měření k bakalářské práci:

Využití Peltierových termočlánků jako alternativního zdroje energie

Vypracoval: Petr Hawliczek
LOGIN: HAW007

Datum měření:
2.3.2011 & 9.3.2011

Měření Peltierové termobaterie TEG1-12610-5.1 použité v demonstračním vozítku „Spalovák 2“

1) Cíl měření:

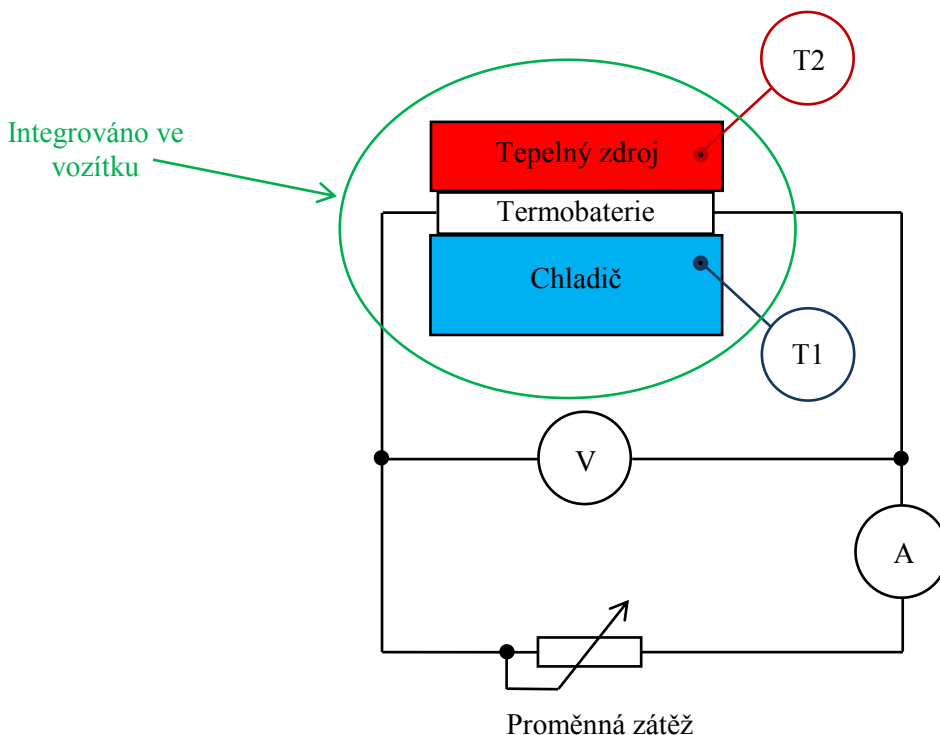
Cílem tohoto měření je změřit vlastnosti termobaterie TEG1-12610-5.1, její výkon a ideální zatěžovací odpor v závislosti na rozdílu teplot horké a chladné strany a porovnat ji s vlastnostmi termobaterie TEG2-12610-5.1. Naměřené data pak použít do bakalářské práce, ve které budu zvažovat ekonomičnost využití termobaterií pro výrobu elektrické energie z odpadního tepla.

2) Postup měření:

- 1) Zapojit schéma pro měření.
- 2) Zapálit zdroj tepla ve vozítku a počkat až se rozdíl teplot na termobaterii ustálí.
- 3) Vytvořit snímek termokamerou a odečíst teploty na stranách termobaterie.
- 4) Provést měření VA-charakteristiky termobaterie.
- 5) Z měření nakrátko určit vnitřní odpor termobaterie.
- 6) Určit výkon termobaterie z VA-charakteristiky při měření se zátěžemi blízkými vnitřnímu odporu termobaterie a určit ideální zátěž (zátěž, u které generuje termobaterie nejvyšší výkon).

3) Schéma zapojení pro měření:

Schéma pro měření termoelektrické baterie TEG1-12610-5.1 se skládá z tepelného zdroje, samotné termobaterie a chlazení. Celá tato část je integrovaná v demonstračním vozítku Spalovák 2, které jsem pro tento účel vyrobil. Ve vozítku je použit typ termobaterie TEG1 kvůli její větší tepelné odolnosti, to je však vykoupeno nižší účinností přeměny tepelné energie na energii elektrickou. Teplota horké i chladné strany je měřena teplotním dataloggerem s termočlánkovými čidly (T1 a T2). Termobaterie se chová jako zdroj elektrické energie s určitým vnitřním odporem a proto je třeba nalézt ideální zátěž pro co největší potenciál využití elektrické energie. Jako proměnná zátěž je použit reostat s relativně nízkým odporem (16Ω). Výkon termobaterie je měřen pomocí voltmetru (V) a ampérmetru (A). Voltmetr je připojen přímo na výstup termobaterie a to kvůli správnosti měření, kdy vznikne znatelný úbytek napětí na ampérmetru. V tomto zapojení se ampérmetr chová jako malý odpor v sérii s reostatem, což nevnáší do měření chybu metody.



4) Vlastnosti Peltierovy termobaterie TEG1-12610-5.1 dle výrobce

Rozměry: 40mm x 40mm x 3mm

Napětí naprázdno: 8.6V

Vnitřní odpor: 3Ω

Napětí při ideálním zatížení: 4.2V

Proud při ideálním zatížení: 1.4A

Výkon při ideálním zatížení: 5.9W

Maximální tepelný tok přes termobaterii: přibližně 140W

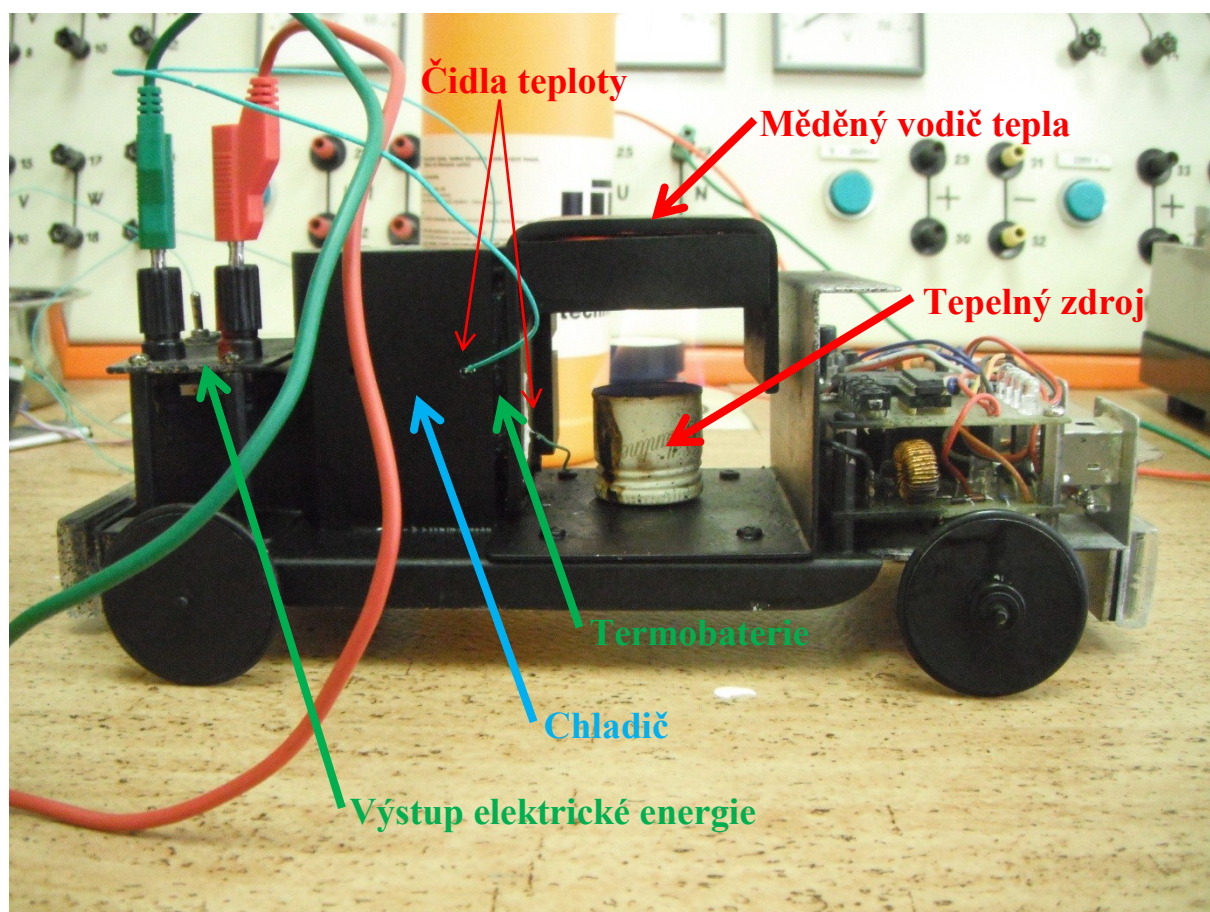
Tepelný tok: přibližně 8.8W/cm²

5) Vzhled reálného zapojení:

Vozítko Spalovák 2 jsem vytvořil jako demonstrační vozítko možnosti využití Seebeckova jevu, čili přeměny tepelné energie přímo na energii elektrickou. Vozítko se skládá ze zdroje energie, ve kterém je lihový kahan jako zdroj tepla, měděného tepelného vodiče, který přivádí teplo na termobaterii, termobaterie samotné a chladiče. Vozítko má přepínač, který umožňuje přepnutí mezi možností napájení samotného vozítka, které se inteligentně pohybuje v prostoru díky integrovaného mikropočítače. Měření termobaterie ve vozítku je zapojeno dle schématu výše.

Vozítko je vyrobeno převážně z hliníku a před tímto měřením mělo i charakteristickou barvu lesklého hliníku. Avšak pro toto měření bylo potřeba vozítko nastříkat emisní barvou, pro přesnost teploty snímků z termokamery. Dále je na fotografii vidět samotný chladič, na místě chladiče byl předtím přišroubován ještě žebrový chladič, pro zlepšení odvodu tepla, ten byl sundán a žebrový chladič na vozítku zůstal jen z druhé strany (na této fotografii ho není moc vidět).

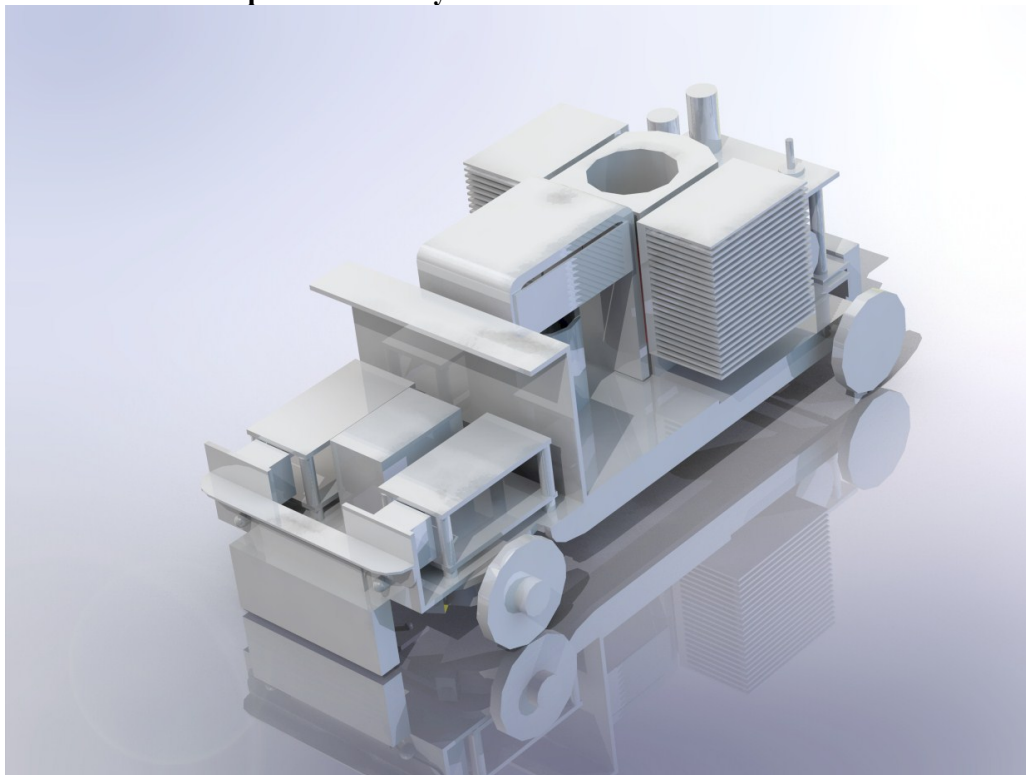
Reálné měření termobaterie ve vozítku „Spalovák 2“:



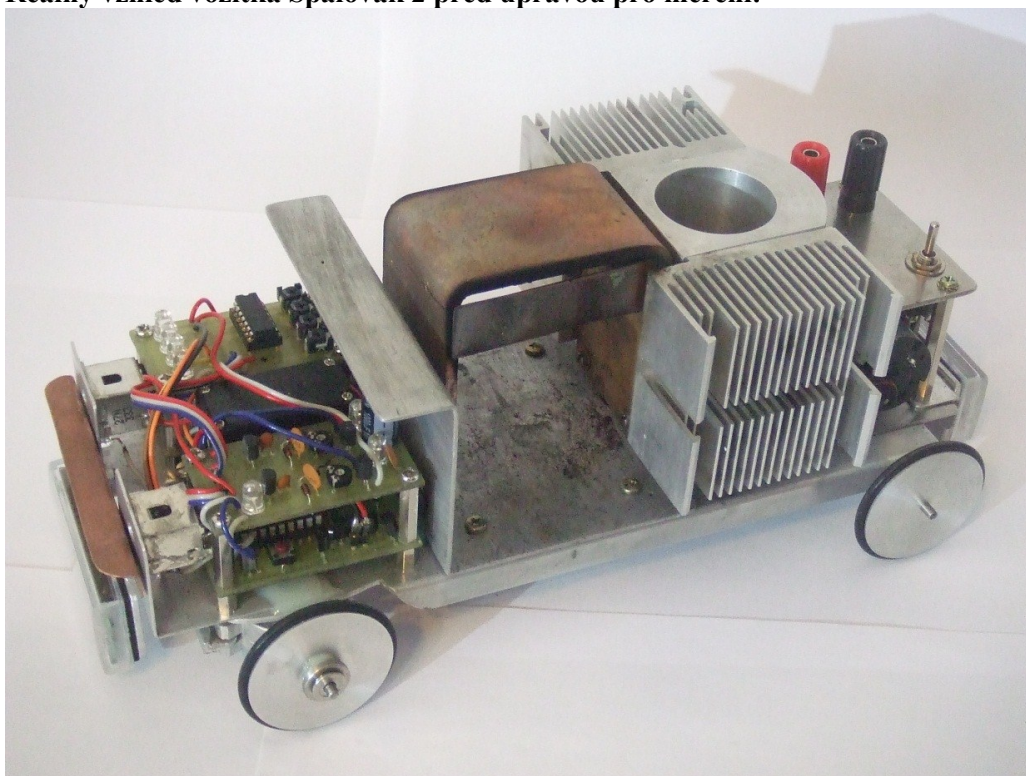
A 3D CAD model of a mechanical assembly, likely a pump or motor component. The assembly is built on a white base plate. Key components include: a large orange rectangular block in the center; a yellow cylindrical component below it; a stack of grey plates to the right; a red cylindrical component and a black cylindrical component on top of the grey stack; a green rectangular component on the left; a purple rectangular component below the green one; a blue rectangular component on the right; and two large white circular flanges at the front and back. The model is rendered with solid colors and black outlines, set against a light blue background.

A 3D CAD model of a mechanical assembly, possibly a motor or actuator. The model features a central gray frame with a large, multi-faceted gray component on the left, resembling a motor housing or a large gear. An orange component is visible on the right side, and a green component is positioned in the center. A purple rectangular plate is attached to the right side of the frame. The assembly is supported by a base with four large, circular, gray feet. The background is a light blue gradient.

3D model vozítka Spalovák 2 lesklý:



Reálný vzhled vozítka Spalovák 2 před úpravou pro měření:



6) Tabulka naměřených a vypočtených hodnot:

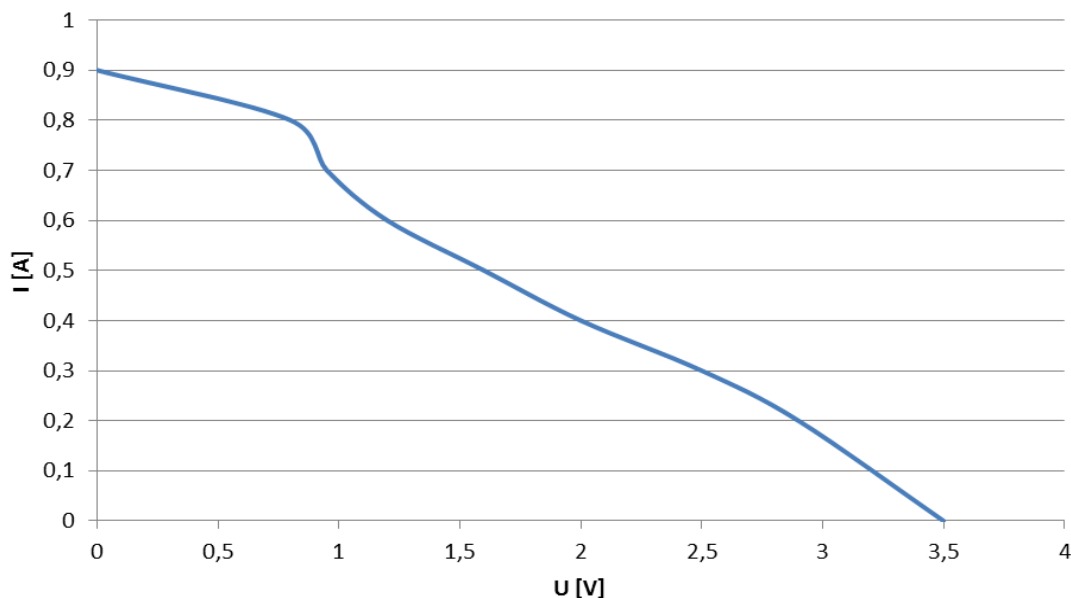
Měření bylo prováděno při okolní teplotě 20°C a vlhkosti 46%.

Tabula je vytvořena pro rozdíl teplot 80°C – teplota horké strany je 180°C a chladné strany 100°C. Tabulka obsahuje naměřené teploty, vypočtený rozdíl teplot. Naměřené napětí a proudy pro různé zátěže a červeně vyznačený řádek pro ideální zátěž, kdy je výstupní výkon nejvyšší. Výkon termobaterie je také vypočten. Jako poslední hodnota v tabulce je vypočten odpor zátěže. Pod tabulkou je vypočten a červeně vyznačen ideální odpor zátěže ($R_{\text{ideální zátěže}}$).

Zátěž č.	T_1	T_2	ΔT	U	I	$P_{\text{výstupní}}$	$R_{\text{zátěže}}$
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[V]	[A]	[W]	[Ω]
1	100	180	80	3,5	0	0,00	naprázdno
2	100	180	80	2,9	0,2	0,58	14,50
3	100	180	80	2,5	0,3	0,75	8,33
4	100	180	80	2	0,4	0,80	5,00
5	100	180	80	1,6	0,5	0,80	3,20
6	100	180	80	1,2	0,6	0,72	2,00
7	100	180	80	0,95	0,7	0,67	1,36
8	100	180	80	0,8	0,8	0,64	1,00
9	100	180	80	0	0,9	0,00	0,00
						$R_{\text{ideální zátěže}}$	3,89

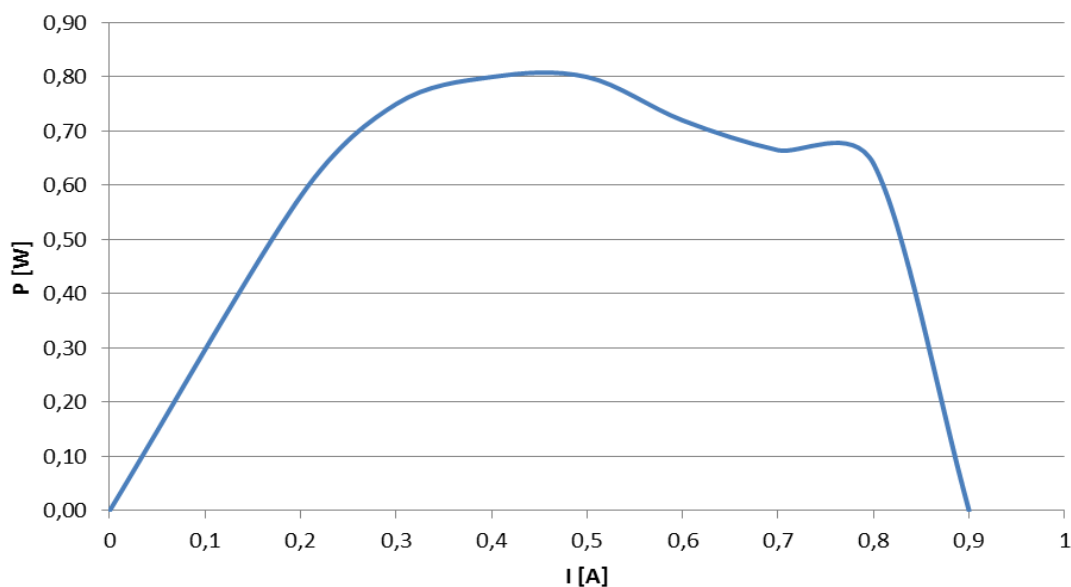
7) Grafy charakteristik termobaterie:

V-A charakteristika při $\Delta T = 80^\circ\text{C}$



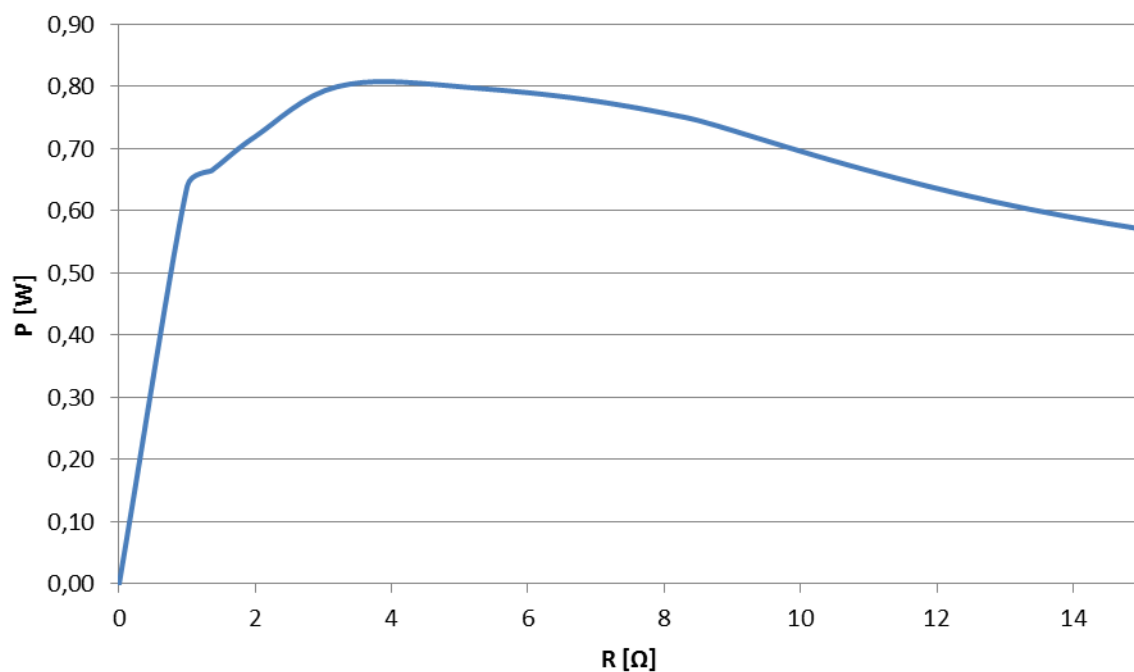
V-A charakteristika by měla být lineární, její úskok u 1V bude způsoben nepřesností měření a změnou teploty při měření.

Závislost výkonu na odebíraném proudu pro $\Delta T = 80^\circ\text{C}$



U závislosti výstupního výkonu na odebíraném proudu lze vidět tentýž úskok, křivka by měla být parabolická. Z grafu je zřejmé, proč je důležité přizpůsobení odběru – vložení ideální zátěže.

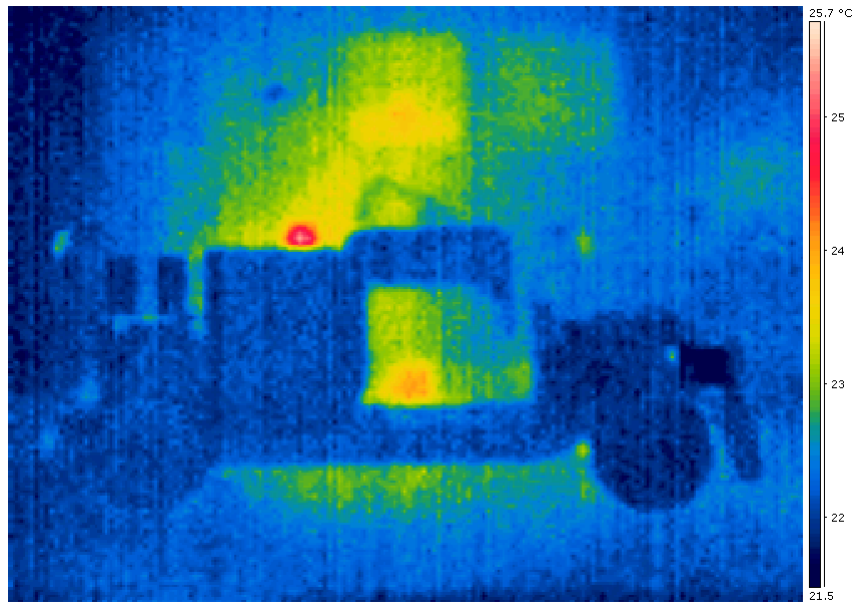
Závislost výkonu na zátěžném odporu při $\Delta T = 80^\circ\text{C}$



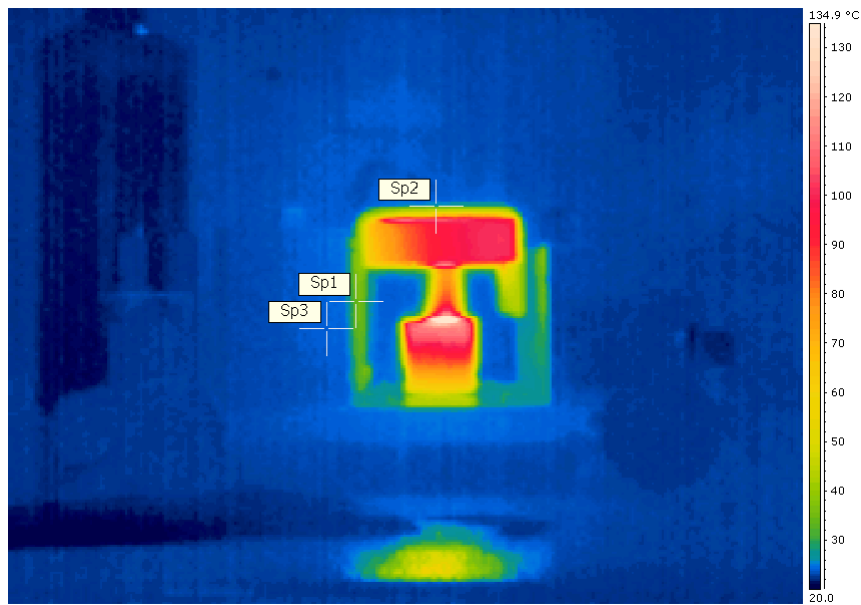
Na grafu závislosti výstupního výkonu na zátěžném odporu je opět vidět, proč je důležité vytvoření ideální zátěže.

8) Snímky z termokamery:

Snímek vozítka za studena:



Snímek rozehřívajícího se vozítka:



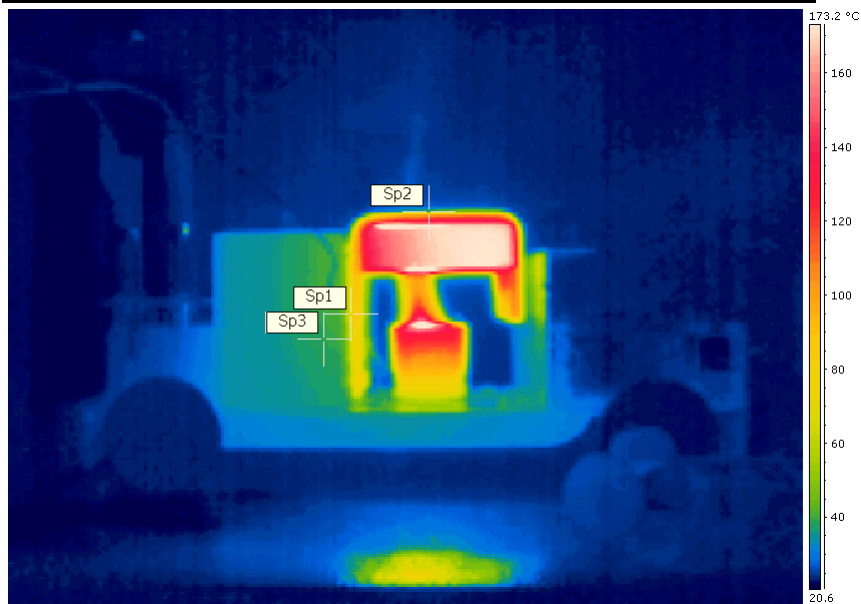
Hodnoty teplot označených bodů:

Sp1 35,0 °C

Sp2 44,9 °C

Sp3 23,8 °C

Snímek s vyšším rozdílem teplot, kdy vozítko už začíná reagovat:



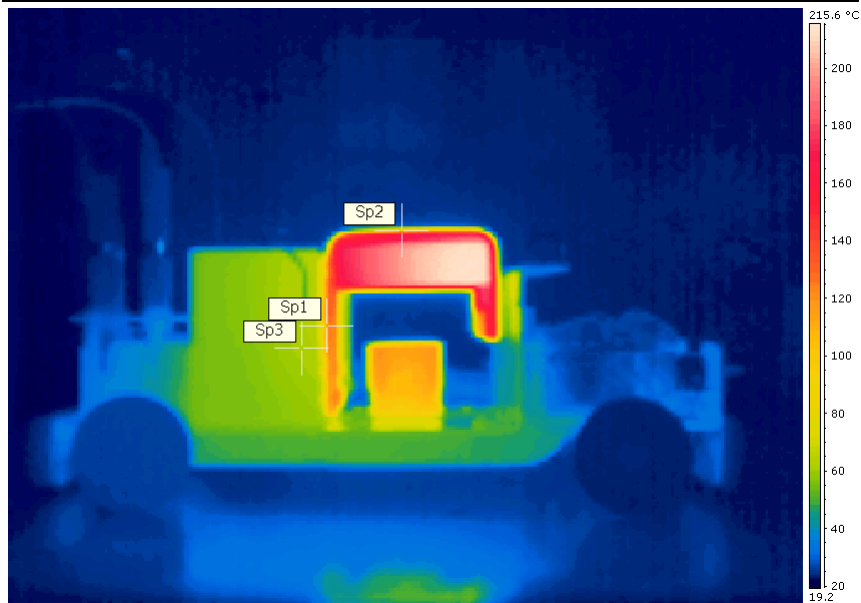
Hodnoty teplot označených bodů:

Sp1 81,7 °C

Sp2 104,7 °C

Sp3 38,6 °C

Snímek vozítka, které má zcela dostatečnou teplotu pro svůj provoz:



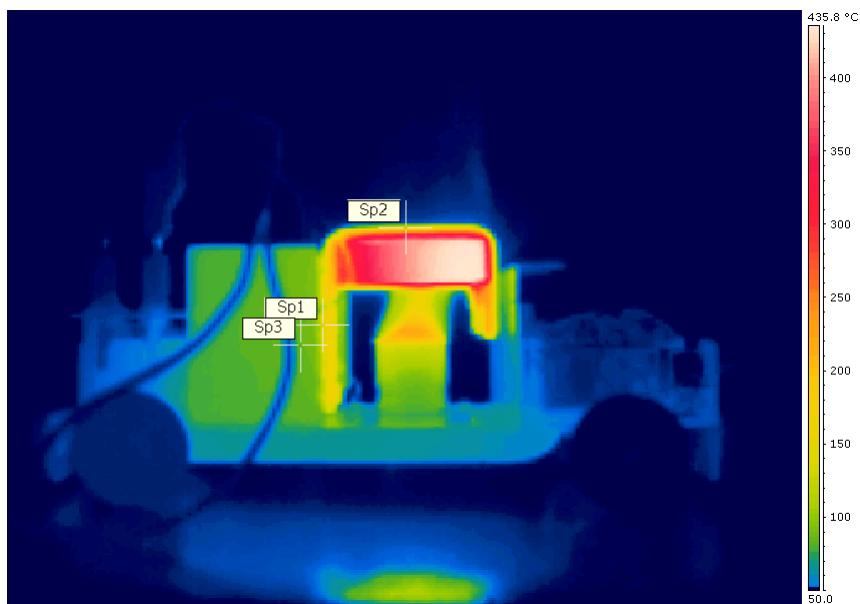
Hodnoty teplot označených bodů:

Sp1 124,6 °C

Sp2 162,8 °C

Sp3 61,2 °C

Snímek vozítka rozehřátého téměř na teplotu tohoto měření:



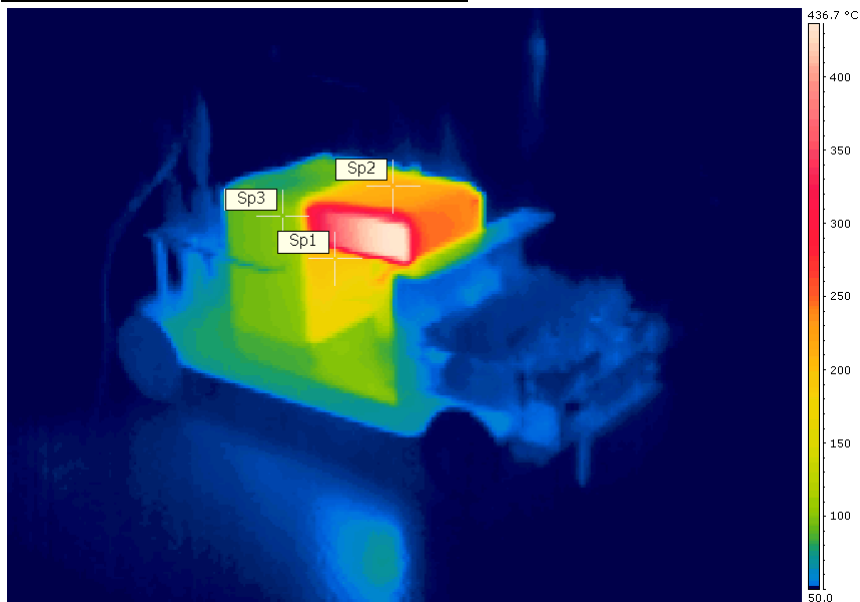
Hodnoty teplot označených bodů:

Sp1 161,2 °C

Sp2 240,6 °C

Sp3 86,1 °C

Snímek vozítka při teplotách měření:



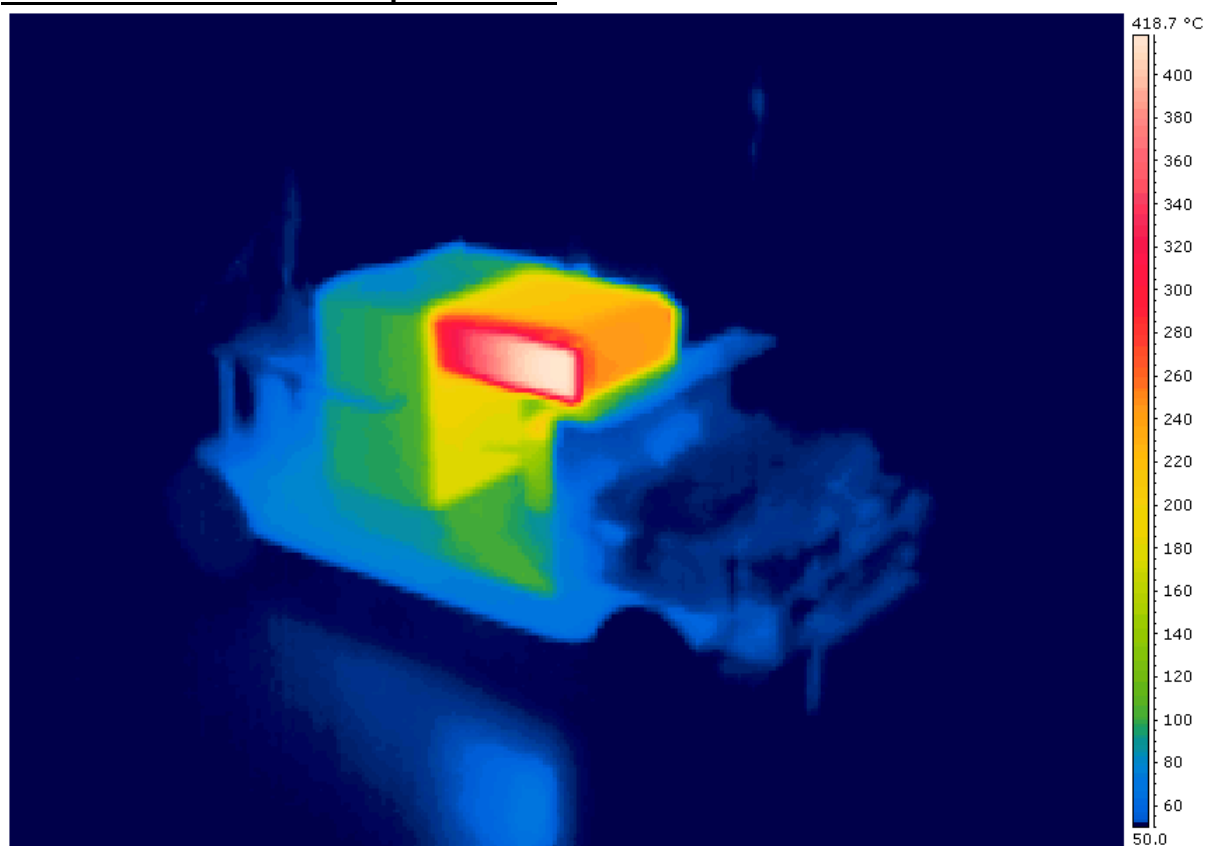
Hodnoty teplot označených bodů:

Sp1 190,3 °C

Sp2 212,9 °C

Sp3 100,2 °C

Snímek samotného vozítka v tepelné oblasti:



9) Použité přístroje:

Termobaterie TEG1-12610-5.1

Vozítko Spalovák 2

Datalogger k měření teplot VOLTcraft K204 (-200°C ~ 1370°C) se dvěma termočláňkovými čidly

Reostat POD60 P7 16Ω/10A

2x multimetr MASTECH MY-68 (měření napětí a proudu)

Termokamera FLIR E45

10) Závěr:

Toto měření bylo zaměřeno na porovnání účinnosti generování elektrické energie z tepelné na velikosti samotné termobaterie. Měření, které jsem prováděl u TEG2-12610-5.1 (nizkoteplotní termobaterie) a srovnání s tímto měřením u vozítka Spalovák 2 s termobaterií TEG1-12610-5.1 (vysokoteplotní termobaterie) je vidět, že termobaterie TEG1-12610-5.1 generuje při rozdílu teplot 80°C maximální výkon kolem 0,8W, za což termobaterie TEG2-12610-5.1 generuje 1,725W (toto číslo je děleno dvěma, protože u měření výměníku byly termobaterie dvě).

Je také vidět, že vnitřní odpor = odpor ideální zátěže termobaterie TEG1-12610-5.1 je mnohem vyšší – kolem 4 Ohmů, za což u TEG2-12610-5.1 se vnitřní odpor pohyboval kolem 0,8 Ohmů na jednu termobaterii.

Snímky s termokamery mají odchylky teplot na rozdíl od teplot naměřených dataloggerem, to může být způsobeno jak nečistotami na povrchu emisní barvy, tak samotným principem měření termokamerou, který je do jisté míry nepřesný.

Podrobnější informace o tomto vozítku lze nalézt na mých stránkách <http://hawelson.blog.cz/0902/spalovak-2>.